

Entwicklung und Installation von Messeinrichtungen zur Untersuchung der Einfangwirksamkeit realer Blitzfangeinrichtungen

Vom Fachbereich 18
- Elektrotechnik und Informationstechnik -
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

Dipl.-Ing. Martin Hannig
geboren am 08. März 1980 in Berlin

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen
Korreferent:	Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack
Tag der Einreichung:	26. 01. 2017
Tag der mündlichen Prüfung:	03. 05. 2017

D17
Darmstadt 2017

Danksagung

Die Arbeit ist während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit an der Technischen Universität Darmstadt im Fachgebiet Hochspannungstechnik entstanden.

Ich danke meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen für sein Vertrauen mich in dieses Projekt einzubinden. Besonders hilfreich waren die inhaltlichen Diskussionen und die offenen kritische Worte. Herrn Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack möchte ich für die Übernahme des Koreferats und seine inhaltlichen Anmerkungen danken. Weiterhin möchte ich Herrn Dr.-Ing. Sebastian Suchanek für die Zusammenarbeit im Fachgebiet und für seine Projektarbeit danken, da es mein Projekt ohne seine Arbeit, vermutlich nicht gegeben hätte. Dankend erwähnen möchte ich auch meine Projektpartner, Herr Dr.-Ing. Ralph Brocke, Herr Dr. Peter Zahlmann und Herr Jens Ehrler, da sie mein Projekt nicht nur begleitet, sondern immer wieder mit neuen Denkanstößen und Impulsen unterstützt haben.

Als weiteren Projektpartner möchte ich die Deutsche Forschungsgesellschaft (DFG) nennen, deren finanzielle Unterstützung einen erheblichen Einfluss auf das Vorkommen dieses Projektes hatte. Für die praktischen Umsetzungen meiner Ideen möchte ich weiterhin der Werkstatt des Fachgebietes Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt danken. Bei der Nutzung des Hochleistungsrechners haben mich insbesondere Herr Dr. Sergey Boldyrev und Herr Thomas Opfer immer wieder mit schnellen und pfiffigen Lösungen unterstützt. Auch den zahlreichen ehemaligen und aktuellen Kollegen des Fachgebietes Hochspannungstechnik der TU Darmstadt möchte ich für die zahlreichen Ideen und Diskussionen danken. Nicht selten entstanden die besten Ideen in geselliger Runde.

Für die Bereitstellung von Blitzortungsdaten in Deutschland und Europa möchte ich mich weiterhin bei Herrn Stephan Thern (Blitz Informationsdienst von Siemens (BLIDS)) und Herrn Dr. Wolfgang Schulz (Austrian Lightning Detection & Information System (ALDIS)) bedanken. Weiterhin sei ein großer Dank an all jene gerichtet, mit denen ich inhaltlich Kontakt hatte, aber nicht einzeln erwähnen kann. Vor allem seien hier die zahlreichen studentischen Arbeiter genannt. Hervorheben möchte ich hier Herrn Henrik Menne, der bei seiner Arbeit sehr gewissenhaft und emsig vorgegangen ist.

Nicht zuletzt möchte ich meinen Eltern und meiner Familie danken. Besonders meiner Lebensgefährtin Anne Zimmermann und meinen beiden Kindern Paula und Oskar sei ein besonderer Dank gewidmet, denn sie haben oft zurück stecken müssen und sind doch mein wichtigster Lebensinhalt.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Verzeichnis der Formelzeichen, Konstanten und Abkürzungen	xiii
Abstract	xxi
Kurzfassung	xxiii
1. Einleitung	1
1.1. Historischer Überblick	1
1.2. Problemstellung	2
1.3. Struktur der Arbeit	4
2. Theoretische Grundlagen	7
2.1. Natürliche Blitzentladungen	8
2.1.1. Abwärtsblitze	10
2.1.2. Aufwärtsblitze	11
2.1.3. Fangentladung	12
2.1.4. Enddurchschlagstrecke	14
2.2. Messen von Blitzströmen	15
2.2.1. Messkonzepte zur Blitzstromerfassung	16
2.3. Messen von Vorentladungen	19
2.3.1. Allgemeine Parameter	19
2.3.2. Ladungsermittlung	19
3. Stand des Wissens zur Entstehung von Fangentladungen	23
3.1. Simulation von Fangentladungen im Labor	23
3.1.1. Positive Streamerentladung	25
3.1.2. Dunkelzeit	27
3.1.3. Übergang vom Streamer- zum Leitblitzmechanismus	28
3.1.4. Kritisches Volumen	30
3.2. Unkonventionelle Blitzschutzkonzepte	31
3.2.1. Allgemeines	31
3.2.2. Collection Volume Method	32
3.2.3. Early Streamer Emission-Prinzip	34
3.2.4. Dissipation Array System	39

4. Ziele der Arbeit	43
5. Entwicklung des Kritischen Volumens im Labor und der Natur	47
5.1. Simulationsansatz	47
5.2. Entwicklung des kritischen Volumens unter natürlichen Bedingungen	49
5.3. Schlussfolgerung	50
6. Konzeptionelle Umsetzung	53
6.1. Erwartete Messdaten	53
6.2. Konzept zur Messdatenerfassung	55
6.3. Konzept zur Vergrößerung der Anzahl von Messereignissen	57
7. Beschreibung des Messsystems	59
7.1. Theoretische Vorbetrachtungen	59
7.1.1. Eingangsgröße: Blitzstrom	59
7.1.2. Eingangsgröße: Vorentladung	61
7.1.3. Datenerfassungseinheit	63
7.1.4. Stromversorgung	63
7.1.5. Feldstärken am Aufstellort	64
7.2. Hochstromsensor zur Erfassung von Blitzströmen	65
7.2.1. Rogowskispule	66
7.2.2. Integrator	69
7.2.3. Übertragungsverhalten	70
7.2.4. Verifikation im Stoßstromlabor	72
7.3. Hochfrequenzstromtransformator	74
7.3.1. Konzeption	75
7.3.2. Signalkonditionierung	76
7.3.3. Übertragungsverhalten	76
7.3.4. Verifikation mit realen Gleitentladungen	77
7.4. Messdatenerfassung mit FPGA	83
7.4.1. Allgemeine Programmierung in Verilog und VHDL	84
7.4.2. Kommunikation	85
7.4.3. Datenauswertung	86
7.5. EMV-Schirmkonzept	86
7.5.1. Abschirmung gegen elektrische Felder	87
7.5.2. Abschirmung gegen magnetische Felder	89
7.6. Unterbrechungsfreie Stromversorgung	90
7.7. Überspannungsschutz	92
7.8. Umwelteinflüsse	92
7.9. Erste Messungen im Hochspannungslabor bei Schaltstoßspannung . .	93
7.10. Zusammenfassung	95

8. Evaluierung der Standortqualität	97
8.1. Allgemeine Randbedingungen zur Maximierung von Messdaten	97
8.1.1. Einfluss der Erdblitzdichte	98
8.1.2. Einfluss der Einfangfläche	99
8.1.3. Einfluss der umliegenden Bebauung und Vegetation	100
8.2. Dynamisches elektro-geometrisches Modell (DEGM) zur Überprüfung der Standorteignung	100
8.2.1. Allgemeines Verfahren	103
8.2.2. Weiterentwicklung zur Anwendung von CAD-Daten	107
8.2.3. Darstellungsform der eDEGM-Ergebnisse	111
8.2.4. Beschreibung der Lösung hochkomplexer Geometrien mit dem Hessischer Hochleistungsrechner (HHLR)	115
8.3. Allgemeine Erkenntnisse zum Aufstellen von Fangstangen	117
8.3.1. Einfluss der Fangstangenhöhe auf die Einfanghäufigkeit	118
8.3.2. Abhängigkeit der Gebäudehöhe auf die Einfanghäufigkeit ei- ner Fangstange	121
8.3.3. Einfluss der Entfernung des Aufstellgebäudes zu anderen Ge- bäuden	124
8.3.4. Einfluss des Aufstellortes auf einem Gebäudedach	127
8.3.5. Optimale Anzahl von Fangstangen auf einem Gebäudedach . .	131
8.3.6. Zusammenfassung der allgemeinen Erkenntnisse	132
8.4. Hochspannungshalle der TU Darmstadt	133
8.5. Versuchsfeld der TU Darmstadt in Griesheim	135
8.6. Messorte in Zusammenarbeit mit dem agrarmeteorologischen Mess- netz Bayern	136
9. Zusammenfassung der Ergebnisse	139
Anhang	143
A. Informationen zur Referenzmesstechnik	145
B. Weiterführende Informationen zur Lightning Partial Discharge Measu- rement Unit (LPDMU)	147
B.1. Integrator	147
B.2. Bandpass	147
B.3. Datenerfassung	148
B.4. Weitere Installationsstandorte der LPDMU	150
B.5. Erdblitzdichte an den Standorten des agrarmeteorologischen Mess- netz Bayern	154
B.6. Übersicht über selbstentwickelte Komponenten der LPDMU	161
C. Heidler-Funktion	163

D. Analytische Grundlagen zu Berechnungen mit dem DEGM	165
D.1. CIGRÉ-Dichtefunktion in Abhängigkeit von der Enddurchschlagstrecke	165
D.2. Integration der CIGRÉ-Dichtefunktion mit einer Polynomfunktion . .	166
Literaturverzeichnis	171
Lebenslauf	189
Erklärung laut § 9 PromO	191

Abbildungsverzeichnis

2.1. Schematische Darstellung der vier Blitztypen mit Erdberührung [HS 2009]	9
2.2. a) Schematische Darstellung der Situation unmittelbar vor dem Enddurchschlag [Has 1989] und b) Hochgeschwindigkeitsaufnahme einer realen Fangentladung in Guangzhou vom 18. Juli 2011 [Lu 2012] . . .	13
2.3. Zusammenhang von Enddurchschlagstrecke r und Stromscheitel I_p nach IEC 62305 [IEC 62305-1] und verschiedenen weiteren Veröffentlichungen	15
2.4. Drei Vorentladungsstromimpulse mit einem Ladungsinhalt von je $1 \mu\text{C}$ im Zeitbereich a) und im Frequenzbereich b)	20
3.1. Schematischer Verlauf der Entstehung einer positiven Leitentladung unter Schaltstoßbeanspruchung (Oben: Spannungsverlauf, Unten: Feldstärkeverlauf an der Elektroden spitze) [CT 1976]	24
3.2. Entwicklung der positiven Streamerentladung. a) Elektron im Grundfeld b) Elektronenlawine c) Strahlung in Folge von Rekombination d) sekundäre Streamerentladungen e) weiteres Vorwachsen des positiven Streamers [HW 2004]	26
3.3. Stromscheitel I_p von Vorentladungen in Abhängigkeit von der Einsetzfeldstärke E_i unter Schaltstoßspannungsbeanspruchung bei unterschiedlichen Stirnzeiten, Elektrodenformen und Schlagweiten [Gro 1972]	27
3.4. Dauer der Dunkelzeit T_d in Abhängigkeit der Einsetzspannung U_i für Spitze-Platte-Anordnung bei einer Schlagweite von 5 m unter Schaltstoßspannungsbeanspruchung bei unterschiedlichen Stirnzeiten [Gro 1972]	28
3.5. Critical Radius Concept a) Durchschlagspannung bei unterschiedlichen Elektrodenradien und Abständen unter Schaltstoßbelastung und b) Darstellung der kritischen Radien bei zwei unterschiedlichen Anordnungen bei unterschiedlichen Schlagweiten mit angedeuteter Asymptote [CT 1976]	29
3.6. Entwicklung des kritischen Volumens (schraffierter Bereich) an einer runden Elektrode bei Steigerung der Spannung U_i und der abgeleiteten Feldstärke E_i im Punkt P_0 [Gal 1979]	30

3.7.	Unterschiedliche Schutzräume, abhängig von Ladung und Geschwindigkeitsverhältnis von Abwärts- und Aufwärtsleitblitz [DG 2001] . . .	33
3.8.	Schnittbild aus dem Patent zur Dynasphere mit (21) leitende Stange, (22) Erdpotential, (24) leitende Hülle, (25) isolierender Stützer, (26) isolierendes Material, (32) Luftspalt, (38) Isolator, (42) einstellbare Impedanz und (43) einstellbare Kapazität [Gum 2001]	36
3.9.	Dreidimensionale Darstellung eines Spline Ball Ionizer (SBI) aus dem Patent [Car 1991]	41
5.1.	Abmaße der Simulationsanordnung mit Randbedingungen zur Berechnung der elektrischen Feldstärke unmittelbar vor der Spitzenelektrode	48
5.2.	Simulation des elektrischen Feldes (Falschfarbe) und Darstellung des kritischen Volumens (grauer Bereich) vor zwei Spitzen mit a) 1 mm und b) 20 mm Krümmungsradius an einer Spitze-Platte-Anordnung mit einer Schlagweite von 2 m und einer angelegten Spannung von 400 kV	49
5.3.	Entwicklung des kritischen Volumens an einer runden Elektrode mit simulierten Feldstärken in der Natur und im Labor mit einer angenommenen Einsetzfeldstärke $E_i = 44 \text{ kV cm}^{-1}$	50
6.1.	Schematische Darstellung der erwarteten Messdaten mit angedeuteten Vorentladungen (orange) und einem anschließenden Hauptblitzstrom (blau)	54
6.2.	Bandbreiten beider Signalaufnehmer und die erwarteten Amplitudendichten (nach [IEC 62305-1] und [Kön 1993]) der Messgrößen für die Rogowskispule (rot und blau) und den Hochfrequenzstromtransformator (gelb)	55
6.3.	Abschätzung der Blitzereignisse pro Jahr in Abhängigkeit von Anzahl und Höhe der Fangstangen, bei einer angenommenen Erdblitzdichte von $N_g = 3,5$, berechnet mit dem erweitertes dynamisches elektrogeometrisches Modell (eDEGM) (Kapitel 8.2.1)	57
7.1.	Amplitudendichtespektren von ersten und Folgestromstößen entsprechend den vier Blitzschutzklassen (Lightning Protection Level (LPL)) nach [IEC 62305-1]	60
7.2.	Nachbildung einer Streamerzone mit Punktladungen und Lösung mit der Charge Simulation Method (CSM) (links) und Gesamtladung innerhalb einer Streamerzone in Abhängigkeit von ihrer geometrischen Länge (rechts)	62

7.3.	a) Darstellung der elektrischen Feldstärken in z-Richtung über ebener Erde bei Annäherung eines Leitblitzes in verschiedenen Entfernungen (0 m, 100 m und 500 m) zum Einschlagpunkt und b) Vergleich der magnetischen azimuthalen Feldstärkekomponente während des Hauptblitzes in der Entfernung von 1 m zum Aufpunkt mit voller retardierter (rot) und einfacher (blau) Betrachtung mit dem Durchflutungssatz . .	65
7.4.	Darstellung der Rogowskispule im azimuthalen Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters, mit $N = 350$ Windungen, einem Spulenradius $r_s = 11,1$ cm, einem Querschnittsradius von $r_k = 2,5$ mm und einen inneren Rückleiter	66
7.5.	Induzierte Spannungen am Ausgang der projektierten Spule bei Belastung mit Erst- (blau) und Folgeblitzen (beige) nach LPL I	68
7.6.	Ersatzschaltbild von Rogowskispule, Anschlusskabel und Integrator mit Tiefpass im Rückkopplungspfad	69
7.7.	Übertragungsfunktionen der Rogowskispule (gelb), des projektierten (blau) und gemessenen Integrators (rot) und das projektierte Übertragungsverhalten bei einer anregenden Stromstärke von 1 A (lila) und einer anregenden Stromstärke 100 kA (grün)	71
7.8.	a) Beispielhafte Messung eines Stoßstromes durch einen Metalloxid (MO)-Varistor der Form 4/10 μ s mit der LPDMU und dem Referenzmesssystem und b) zeitliche Ableitung zur Ermittlung der Stromsteilheit	72
7.9.	Messung von 100 Stoßströmen bei 30 kA der Form 4/10 μ s mit einer Standardabweichung von $\pm 0,9\%$	73
7.10.	Stoßstrom der Form 4/10 μ s über einen ohmschen Widerstand im a) Zeitbereich und b) Frequenzbereich	74
7.11.	Aufbau des Hochfrequenzstromtransformators mit den projektierten Randdaten	75
7.12.	Aufbau der projektierten Signalkonditionierung mit zwei Dämpfungsgliedern und einem Bandpass dritter Ordnung	76
7.13.	Gemessenes Übertragungsverhalten des High Frequency Current Transformer (HFCT), des Bandpasses mit integriertem Dämpfungsglied und die Summe beider Glieder	77
7.14.	Messung von Gleitentladungen mit der LPDMU und dem kommerziellen Teilentladungsmesssystem MPD 600 der Firma Omicron	78
7.15.	Teilentladungsimpulse an einer Toeplerschen Gleitanordnung, die mit der LPDMU gemessen worden sind (a) 4 ms-Ausschnitt b) Einzelimpuls 5 μ s	79
7.16.	Häufigkeitsverteilung des Auftretens eines Zeitversatzes zwischen Teilentladungspaaren, gemessen mit zwei unsynchronisierten Messsystemen	80

7.17. Ausschnitt Teilentladungsmessereignisse gemessen mit dem Omicron-System und der LPDMU im Zeitbereich, mit eingefärbten Korrelationsabständen zu jedem Korrelationspaar	81
7.18. Qualitatives zweidimensionales Histogramm aller Frequenzdichtespektren der Teilentladungsereignisse, gemessen mit der LPDMU . . .	82
7.19. Vergleich der korrelierten Ladungspaare gemessen mit dem Omicron-System bei einer Mittenfrequenz von 650 kHz (Referenz) und der LPDMU bei einer Mittenfrequenz von 3 MHz	83
7.20. Übertragungsverhalten eines bewickelten Balanced Unbalanced (BALUN)s mit verschiedenen Windungen bei Gleichtaktsignalen . . .	88
7.21. a) Aufbau der in der Messeinrichtung eingesetzten BALUNe und b) Übertragungsverhalten bei Gleichtaktbeanspruchung	89
7.22. Induzierte Überspannung an einer geschirmten quadratischen Leiter-schleife bei einer angelegten äußeren Feldstärke von 100 kA m^{-1} in Abhängigkeit der Frequenz	90
7.23. Mittlere Sonnenscheindauer und Anzahl an Erdblitzten in den Kalen-dermonaten in 20 km Umkreis um Darmstadt in den Jahren 2006 bis 2015 aus frei zugänglichen Temperaturdaten des Deutscher Wetter-dienst (DWD) und Blitzortungsdaten von BLIDS	91
7.24. Messung der hochfrequenten Vorentladungsströme in der Hochspan-nungshalle der TU Darmstadt mit einem genormten negativen Schalt-stoßspannungsbeanspruchung; Zeit bis zum Durchschlag $106 \mu\text{s}$	93
7.25. Überlagerte Vorentladungsmessungen an einer Fangstange unter Schaltstoßspannungsbeanspruchung als a) Phase Resolved Partial Discharge (PRPD)-Darstellung und b) 3-Channel Frequency Relation Diagram (3CFRD)-Darstellung mit markanter Clusterbildung	94
8.1. Erdblitzdichte in und um Darmstadt in den Jahren 2006 bis 2015 . .	99
8.2. Kumulierte Häufigkeit nach CIGRÉ für negative (blau), positive (rot) und $0,9 \cdot \text{neg.} + 0,1 \cdot \text{pos.}$ (gelb) Erstblitze über der Enddurchschlag-strecke (logarithmisch) und dem Stromscheitelwert (verknüpft über Gleichung 2.1) mit Unstetigkeit bei $I_p = 20 \text{ kA}$ bzw. $r = 70,1 \text{ m}$. . .	102
8.3. Darstellung der Gewichtung von Hüllflächenelementen einer quadrati-schen Grundfläche und eines Eckenelementes mit der Dichteverteilung von Erstblitzen nach CIGRÉ	104
8.4. Dichtefunktionen über die Auftretenswahrscheinlichkeit von negati-ven und positiven Abwärtsblitzen, sowie die Multiplikation mit der Hüllfläche und Ermittlung der Einfangfläche an einem Kantenelement	106
8.5. Algorithmus zur Berechnung der Einfangwahrscheinlichkeit von Ob-jekten in COMSOL Multiphysics® und MATLAB® auf Grundlage des DEGM	107

8.6.	Errichten von Normalenvektoren auf allen Flächen, Kanten und Ecken eines Objektes in der Totalen (links) und einer Ecke (rechts) mit einem vergleichsweise geringen Diskretisierungsfaktor von $f_{\text{eDEGM}} = 10109$	
8.7.	Qualitative Darstellung der Konstruktion von Teilhüllflächen einer Struktur und ihre Abhängigkeit im Falle a) eines Flächenelementes, b) eines Kantenelementes und c) eines Eckenelementes	110
8.8.	Darstellung der maximalen Blitzkugelradien an einem Standardgebäude auf ebener Erde	111
8.9.	Darstellung der Einfangflächen A_d an einem Standardgebäude auf ebener Erde	112
8.10.	Darstellung der Flächeninhalte aller diskretisierten Einzelflächen an einem Standardgebäude auf ebener Erde	113
8.11.	Berechnung eines Standardgebäudes ($H \times B \times T$: $10 \text{ m} \times 40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$) mit dem eDEGM bei einem Diskretisierungsfaktor von $f_{\text{eDEGM}} = 50$ und Ausgabe der Einfangflächen aller vier Eckenelemente	114
8.12.	Berechnung einer Windenergieanlage mit einer Nabenhöhe von 50 m und einem Rotordurchmesser von 48 m (E-48, ENERCON) bei einer Winkelstellung von 68°	116
8.13.	Bemaßung eines quadratischen Standardgebäudes der Kantenlänge d_g und einer Höhe h_g mit einer simulierten Umgebung mit einer inneren Breite von $d_{u,i}$, einer äußeren Breite von $d_{u,a}$ und einer Höhe von h_u und einer Fangstange von variabler Höhe und Aufstellort	118
8.14.	Einfangwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Höhe einer Fangstange h_f zwischen 0 m und 50 m bei Aufstellung auf ebenem Boden	119
8.15.	Entwicklung der kumulierten und gewichteten Einfangflächen (grau) in Abständen von 5 m an vier unterschiedlich hohen Fangstangen, mit $h_f = 10 \text{ m}$, 30 m , 50 m und 70 m und das resultierende Fangvolumen (rot)	120
8.16.	Abhängigkeit der Einfangwahrscheinlichkeit von drei verschiedenen Fangstangen in der Mitte des Daches in Abhängigkeit der Höhe des Standardgebäudes	122
8.17.	Einfangflächendichteverteilungen an a) der Fangstange der Höhe $h_f = 20 \text{ m}$ und b) des Standardgebäude bei vier verschiedenen Standardgebäudehöhen $h_g = 0 \text{ m}$, 10 m , 30 m und 50 m über den Blitzkugelradius r in Quadratmeter pro Blitzkugelradius	123
8.18.	Überschreitungswahrscheinlichkeiten für Blitzstromscheitelwerte I_p aller Fangstangen und Standardgebäude bei den vier unterschiedlichen Fällen	124
8.19.	Einfluss der Höhe der Umgebung bei drei verschiedenen Abständen zur umgebenden Bebauung auf die Einfangwahrscheinlichkeit einer auf dem Standardgebäude ($h_g = 10 \text{ m}$) mittig aufgestellten hohen Fangstange ($h_f = 10 \text{ m}$)	125

8.20. Darstellung des Einflusses verschieden hoher Umgebungen auf die Einfangwahrscheinlichkeit einer 10 m hohen Fangstange auf einem 10 m hohen Standardgebäude bei unterschiedlichen Abständen zur Umgebung und vier unterschiedlichen Umgebungshöhen	127
8.21. Prozentualer Einfluss des Aufstellortes einer 10 m hohen Fangstange auf dem Dach des Standardgebäudes mit einer Höhe von 10 m gegenüber einem zentralen Aufstellort	129
8.22. Prozentualer Einfluss des Aufstellortes einer 10 m hohen Fangstange auf dem Dach des Standardgebäudes mit einer Höhe von 30 m gegenüber einem zentralen Aufstellort	130
8.23. Prozentualer Einfluss des Aufstellortes einer 10 m hohen Fangstange auf dem Dach des Standardgebäudes mit einer Höhe von 30 m	131
8.24. Verlauf der Erdblitzdichte in einem Umkreis von 2 km um die Hochspannungshalle der Technischen Universität Darmstadt in den Jahren 2005 bis 2014	133
8.25. Berechnung der Einfangflächen an einem 3D-Modell der Hochspannungshalle der Technischen Universität Darmstadt mit Hilfe des DEGM	134
8.26. Verlauf der Erdblitzdichte an dem Testfeld der Technischen Universität Darmstadt in Griesheim in den Jahren 2005 bis 2014	135
8.27. Messnetz des Agrarmeteorologischen Messdienstes Bayern mit der Information der Erdblitzdichte an den Standorten in den Jahren zwischen 2000 bis 2015 mit Kennzeichnung der bereits mit Fangstangen ausgerüsteten Messorte	136
B.1. Standort Almesbach (agrarmeteorologischer Messdienst Bayern)	150
B.2. Standort Spitalhof (agrarmeteorologischer Messdienst Bayern)	151
B.3. Standort Westerschondorf (agrarmeteorologischer Messdienst Bayern) .	151
B.4. Standort Karolinenfeld (agrarmeteorologischer Messdienst Bayern) . .	152
B.5. Standort Rotthalmünster (agrarmeteorologischer Messdienst Bayern) .	152
B.6. Standort Kringell (agrarmeteorologischer Messdienst Bayern)	153
B.7. Standort Schwarzenau (agrarmeteorologischer Messdienst Bayern) . . .	153
B.8. Standort Veitshöchheim (agrarmeteorologischer Messdienst Bayern) . .	154
B.9. Übersicht über die LPDMU mit angeschlossener autarker Stromversorgung, sowie einigen ausgewählten selbst entwickelte Komponenten	161

Verzeichnis der Formelzeichen, Konstanten und Abkürzungen

Liste der Formelzeichen

A_d	m^2	Einfangfläche nach IEC 62305
$A_{d,analytisch}$	m^2	Gewichtete analytische Einfangfläche eines Elementes
$A_{d,analytisch,ges}$	m^2	Gewichtete analytische Einfangfläche aller Elemente
$A_{d,eDEGM}$	m^2	Gewichtete Einfangfläche mit dem DEGM
$A_{d,eDEGM,300\text{ m}}$	m^2	Gewichtete Einfangfläche eines Elementes mit maximalen Blitzkugelradius von 300 m mit dem DEGM
$A_{d,eDEGM,1000\text{ m}}$	m^2	Gewichtete Einfangfläche eines Elementes mit maximalen Blitzkugelradius von 1000 m mit dem DEGM
$A_{d,Z,300\text{ m}}$	m^2	Gewichtete zylindrische Einfangfläche mit maximalen Blitzkugelradius von 300 m
$A_{d,Z,1000\text{ m}}$	m^2	Gewichtete zylindrische Einfangfläche mit maximalen Blitzkugelradius von 1000 m
$A_{d,Z,analytisch}$	m^2	Analytisch bestimmte gewichtete zylindrische Einfangfläche
A_e	m^2	Effektive Querschnittsfläche des HFCT
A_h	m^2	Allgemeine Hüllfläche
$A_{h,n}$	m^2	Teilhüllfläche
$A_{h,Q,n}$	m^2	Quadratische Teilhüllfläche
$A_{h,Z,n}$	m^2	Zylindrische Teilhüllfläche
B_{sat}	T	Sättigungsflussdichte
C_d		Korrekturfaktor für die Einfangfläche
C_K	F	Koppelkapazität
C_p	F	Parallele Kapazität
C_{RC}	F	Kapazität der Rogowskispule

C_s	F	Serielle Kapazität
C_{Stoss}	F	Stoßkondensator
d	m	Schlagweite
d_g	m	Distanz zur Gebäudekante
$d_{u,a}$	m	Distanz zur Umgebung, äußere Kante
$d_{u,i}$	m	Distanz zur Umgebung, innere Kante
d_z	m	Dicke Zylinder
E_0	V m^{-1}	Unverzerrte Grundfeldstärke
E_i	V m^{-1}	Feldstärke der ersten Entladung (Einsetzfeldstärke)
f	Hz	Frequenz
f_{eDEGM}		Diskretisierungsfaktor für die eDEGM-Simulation
f_g	Hz	Grenzfrequenz
f_i		Dichtefunktion für die Auftretenswahrscheinlichkeit von Erstblitzen
f_u	Hz	Untere Grenzfrequenz
f_o	Hz	Obere Grenzfrequenz
G_0		Gleichspannungsverstärkung
H	A m^{-1}	Magnetische Feldstärke
H_a	A m^{-1}	Magnetische Feldstärke im Äußeren
h_f	m	Höhe der Fangstange
h_g	m	Höhe des Gebäudes
H_i	A m^{-1}	Magnetische Feldstärke im Inneren
H_O	m	Höhe eines Objektes
h_u	m	Höhe der Umgebung
i	A	Elektrischer Strom
\hat{i}	A	Stromscheitelwert mit Impulscharakter
I_p	A	Blitzstromscheitelwert
I_{sat}	A	Sättigungsstrom
k	m^{-1}	Wirbelstromkonstante
\underline{K}		Schirmbeiwert
K_i		Intensivierungsfaktor in der CVM
K_v		Geschwindigkeitsfaktor von Fangentladung zu Abwärtsblitz in der CVM
l_e	m	Effektive Länge des HFCT
Δl_{ESE}	m	Längenvorteil eines ESE-Device gegenüber gewöhnlicher Fangstange
L_{HFCT}	H	Induktivität des Hochfrequenztransformators

L_O	m	Länge eines Objektes
L_p	H	Parallele Induktivität
L_{RC}	H	Eigeninduktivität der Rogowskispule
L_s	H	Serielle Induktivität
L_{Stoss}	H	Stossinduktivität
M_{RC}	V s A ⁻¹	Gegeninduktivität der Rogowskispule
N		Anzahl Spulenwindungen einer Rogowskispule
N_2		Anzahl Windungen auf der Sekundärseite
n_{Ecke}		Anzahl von Elementen eines Ecken- oder Punkt- elementes
N_g		Erdblitzdichte in Erdblitzten pro Quadratkilometer und Jahr
N_D		Anzahl erwarteter Blitzeinschläge an einem Ob- jekt
n_{Kante}		Anzahl von Elementen eines Kantenelements
ω	s ⁻¹	Kreisfrequenz
P_{eDEGM}	% km ⁻²	Einfangwirksamkeit nach dem eDEGM
Q	C	Ladung
r	m	Radius der Blitzkugel (Enddurchschlagstrecke)
$R_{Bürde}$	Ω	Widerstandsbürde
r_c	m	Enddurchschlagstrecke zu Freileitungsleiterseil
R_d	Ω	Dämpfungswiderstand
r_g	m	Enddurchschlagstrecke zu Freileitungserdseil
r_k	m	Außenradius der Spule der Rogowskispule
r_{max}	m	Maximaler Blitzkugelradius
r_s	m	Radius der gewickelten Rogowskispule
R_{Stoss}	Ω	Stosswiderstand
r_z	m	Radius Zylinder
S_{HFCT}	V A ⁻¹	Sensitivität des Hochfrequenztransformators
S_{RC}	V A ⁻¹	Sensitivität der Rogowskispule
$S_{HFCT,BP,dB}$	V A ⁻¹	Sensitivität des Hochfrequenztransformators mit angeschlossenem Bandpass und Dämpfungsglied
t	s	Zeit
T_1	s	Zeitpunkt der Einschnürung des Entladekanals
T_d	s	Dauer der Dunkelzeit
Δt_{ESE}	s	Zeitvorteil eines ESE-Device gegenüber gewöhnli- cher Fangstange
T_i	s	Zeitpunkt der ersten Entladung (Einsetzzeit)

T_k		keraunischer Pegel (Gewittertage pro Jahr)
U_i	V	Spannungswert der ersten Entladung (Einsetzspannung)
u_{in}	V	Eingangsspannung
U_{ind}	V	Induzierte Spannung
u_{out}	V	Ausgangsspannung
v_{ESE}	m s^{-1}	Relative absolute Geschwindigkeit zwischen Fangentladung und Abwärtsblitz an einem ESE-Device
V_{krit}	m^3	Kritisches Volumen
v_l	m s^{-1}	Geschwindigkeit eines negativen Abwärtsblitzes
W_O	m	Breite eines Objektes
ε	$\text{A s V}^{-1} \text{m}^{-1}$	Permittivität
ε_r		Relative Permittivitätszahl
κ	S m^{-1}	Elektrische Leitfähigkeit
μ	$\text{V s A}^{-1} \text{m}^{-1}$	Permeabilität
M_i	A	Medianwert des Blitzstromes
μ_r		Relative Permeabilitätszahl
Ω_o	sr	Öffnungswinkel eines Ecken- oder Punktelements
φ_o	rad	Öffnungswinkel eines Kantenelements
Φ	V	Elektrisches Potential
β_i		logarithmische Standardabweichung des Blitzstromes

Liste der Konstanten

ε_0	$8,854 \cdot 10^{-12} \text{ A s V}^{-1} \text{m}^{-1}$	Dielektrizitätskonstante
μ_0	$1,256 \cdot 10^{-6} \text{ V s A}^{-1} \text{m}^{-1}$	Permeabilitätskonstante

Liste der Abkürzungen

3CFRD	3-Channel Frequency Relation Diagram
AC	Alternating Current
AD	Analog-Digital
ADC	Analog-Digital Converter
AKV	Ankoppelvierpol
ALDIS	Austrian Lightning Detection & Information System

AT	Attention
BALUN	Balanced Unbalanced
BLIDS	Blitz Informationsdienst von Siemens
BP	Bandpass
CAD	Computer Aided Design
CC	Cloud to Cloud
CFO	Critical Flashover
CG	Cloud to Ground
CL	Connecting Leader
CIGRÉ	International Council on Large Electric Systems
CSM	Charge Simulation Method
CTS	Charge Transfer System
CVM	Collection Volume Method
DAS	Dissipation Array System
DC	Direct Current
DEGM	Dynamisches elektro-geometrisches Modell
DFG	Deutsche Forschungsgesellschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung
DL	Dart Leader
DSL	Dart Stepped Leader
DWD	Deutscher Wetterdienst
eDEGM	erweitertes dynamisches elektro-geometrisches Modell
EDF	Électricité de France
EGM	Elektro-geometrisches Modell
EN	Europäische Norm
ENOB	Effective Number of Bits
ESE	Early Streamer Emission
ESEAT	Early Streamer Emission Air Terminal
FEM	Finite Elemente Methode

FFT	Fast Fourier Transform
FIFO	First In First Out
FJ	Final Jump
FPGA	Field Programmable Gate Array
FRS	First Return Stroke
GC	Ground to Cloud
GLT	Global Lightning Technology
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HHLR	Hessischer Hochleistungsrechner
HFCT	High Frequency Current Transformer
ICC	Initial Continuing Current
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IPG	Ion Plasma Generator
LDN	Lightning Detection Network
LEC	Lightning Eliminators & Consultants
LPDMU	Lightning Partial Discharge Measurement Unit
LPL	Lightning Protection Level
LSB	Least Significant Bit
LTI	Linear Time Invariant
MCU	Measurement Controlling Unit
MPD	Measurement Unit Partial Discharge
MO	Metalloxid
MSB	Most Significant Bit
NF C	Normes Francaises Class C
NRS	No Return Stroke
PB	Preliminary Breakdown

PC	Personal Computer
PEM	Power Electronic Measurements
PLL	Phase Locked Loop
PWM	Pulse Width Modulation
PRPD	Phase Resolved Partial Discharge
PSA	Puls-Sequenz Analyse
RC	Rogowski-Coil
RS	Return Stroke
RS232	Radio Sector 232 (serielle Schnittstelle)
RTL	Register Transfer Level
SBI	Spline Ball Ionizer
SBT	Spline Ball Terminal
SDMC	Secure Digital Memory Card
SDAT	Streamer Delaying Air Terminal
SDRAM	Synchronous Dynamic Random Access Memory
SL	Stepped Leader
SLIM	Self Consisting Leader Inception Modell
SMS	Short Message Service
SRAM	Static Random Access Memory
SRS	Subsequent Return Stroke
TE	Teilentladung
VHDL	Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language
WEA	Windenergieanlage

Abstract

Lightning protection in general has changed only a little since its introduction. Lightning rods collect lightning flashes and conduct the lightning current to ground. A lightning rod, that is placed correctly is the first step of an effective lightning protection system. Intense laboratory testing and field measurements have established the main concepts for a successful lightning protection. National (DIN EN 62305) and international (IEC 62305) standards define the application of successful outer lightning protection systems. However, in the past decades, new lightning protection concepts, as well as active lightning rods, were introduced. This new technology is rumored to have several advantages, compared to the conventional lightning rods. In spite of this progress, lightning experts all over the world are not convinced of the improved lightning rods and their concepts. However, more and more of these rods are installed, even in Germany, although there is no standardization (exception: French standard NF C 17-102). Above all, there is no scientific evidence for the successful operation of these new devices. Theoretical analysis und simulations prove and disprove these new protection concepts. There is an urgent need to examine the inception of real lightning connecting leaders under natural conditions, to better evaluate the behavior of new lightning protection concepts. The aim of this investigation is to deliver measurement data from the inception of real connecting leaders, which is actually difficult to achieve. Hereby it should be possible to survey theoretical concepts and simulations, which are concerned with the inception of connecting leaders. In addition, conclusions can be drawn, which connect the appearance of the lightning protecting system to its effectiveness. Moreover a new simulation methodology, wich is capable to calculate the interception efficiencies on buildings is adopted and improved to calculate the exact interception areas of lightning rods. Different investigations are conducted to show the dependency of interception efficiency on differnt rod locations with the prerequisite of gathering as much lightning strikes as possible. In this work a measurement concept is presented, a measurement device is developed, the effective placement of measurement units are determined and first installations have been done. The first installation is online without any drop out, since nerally two years.

Kurzfassung

Der Schutz vor natürlichen Blitzen hat sich seit seiner Einführung grundlegend wenig verändert. Man versucht, den Blitz mit einer Fangstange einzufangen und den Blitzstrom einer Erdungsanlage zuzuführen. Eine wirksame und richtig aufgestellte Fangstange ist für ein Blitzschutzsystem somit zwingend erforderlich. Aufwändige Laboruntersuchungen und Feldmessungen haben die Grundlagen für einen erfolgreichen Blitzschutz definiert. Nationale (DIN EN 62305) und internationale Normen (IEC 62305) beschreiben die Anwendung des konventionellen äußeren Blitzschutzes. In den letzten Jahrzehnten jedoch wurden elektronische Fangeinrichtungen und neuartige Schutzkonzepte entwickelt, die verschiedene Vorteile gegenüber den gewöhnlichen Fangstangen mit sich bringen sollen. Diese sind in der Fachwelt stark umstritten, und obwohl diese neuen Fangeinrichtungen in keiner Norm (Ausnahme: französische Norm NF C 17-102) erwähnt werden und somit nicht zu den anerkannten Regeln der Technik gehören, werden sie dennoch, auch in Deutschland, bereits verbaut. Einen wissenschaftlichen Nachweis zur Wirkungsweise dieser Fangeinrichtungen unter realen Bedingungen gibt es nicht. Theoretische Berechnungen und Simulationen in Hochspannungslaboratorien stützen und widerlegen die Vorteile der neuartigen Schutzsysteme gleichermaßen. Es besteht dringender Bedarf, die Vorgänge bei der Entstehung von realen Fangentladungen unter natürlichen Bedingungen genauer zu untersuchen, um neuartige Blitzschutzkonzepte angemessen beurteilen zu können. Diese Arbeit beschreibt, wie die nur sehr schwer zugänglichen Messdaten zur Entstehung realer stabiler Fangentladungen geliefert werden können. Mit ihnen ist es einerseits möglich, die theoretischen Konzepte und Simulationen zur Entstehung von realen Fangentladungen zu überprüfen, und andererseits können Aussagen zum Einfluss der Fangeinrichtungsbeschaffenheit auf die Wirksamkeit der Fangeinrichtung getroffen werden. Die Arbeit verbessert darüber hinaus eine innovative Methode zur Berechnung der Einfangwirksamkeit von Gebäuden. Es werden die exakten Einfangflächen von Fangstangen bestimmt. Es wird detailliert gezeigt, wie Fangstangen aufgestellt werden müssen, um möglichst viele Blitzereignisse einzufangen. Ein Messkonzept wurde entworfen, eine Messeinrichtung entwickelt, effektive Aufstellorte eruiert und erste Fangstangen instrumentiert. Die erste Installation ist bereits seit bald zwei Jahren, wartungsfrei, in Betrieb.

1. Einleitung

1.1. Historischer Überblick

Blitzentladungen gehören zu einem der faszinierendsten Naturschauspiele. Seit Jahrtausenden begeistern und erschrecken sie die Menschheit mit ihrem Donner und der „brennenden Luft“. Die erste gesicherte Darstellung eines Blitzes befindet sich auf einem mesopotamischen Rollsiegel aus der altakkadischen Zeit (um 2200 v. Chr.), bei der eine Gottheit auf einer Kreatur steht und Blitze in beiden Händen hält [Pri 1977]. Das imposante, jedoch unverstandene Phänomen wurde in den verschiedensten Kulturkreisen mit Gottheiten in Verbindung gebracht. Es bestand schon immer der Wunsch, dieser Gewalt Herr zu werden. Im Mittelalter wurde daher versucht, durch das Leuten von Kirchenglocken den Zorn der Götter zu besänftigen. Viele dieser Glöckner kamen jedoch ums Leben, so zum Beispiel als im Jahr 1718 ein Gewitter in der Bretagne, in der Nacht vom 14. zum 15. April, 24 verschiedene Kirchen traf [Has 2010].

Die ersten wissenschaftlichen Erkenntnisse zu diesem mythischen Phänomen sind auf das Jahr 1752 datiert. Hier konnte mit dem Schilderhaus-Experiment bewiesen werden, dass Blitze elektrischen Ursprungs sind. Bei diesem Experiment sollte sich eine Person mit Hilfe einer Metallstange isoliert in einem Gewitterfeld aufladen und elektrische Funken erzeugen. Diese Art der Experimente nahm jedoch ein jähes Ende, als 1753 ein Blitz die Metallstange des estnischen Physikers Georg Wilhelm Riechmann traf und dieser dabei ums Leben kam [Has 2010]. Benjamin Franklin erkannte jedoch, dass Blitze genau wie elektrische Funken einem durchgehenden Leiter folgen müssen. Er schlug vor, ein Gebäude mit einer geerdeten Stange auszurüsten. Etwas ähnliches hatte Prokop Diviš kurz zuvor realisiert, jedoch nicht direkt an einem Gebäude. Die Absicht beider war nicht, den Blitz gezielt einzufangen, sondern das Absaugen der Elektrizität aus der Atmosphäre. Die durch Franklin

aufgestellten und geerdeten Fangstangen wurden von Blitzen getroffen, und es zeigte sich, dass hierbei keine Blitzschäden an den Gebäuden entstanden [RU 2003]. Erst jetzt war das Einfangen und Ableiten von Blitzentladungen das erklärte Ziel.

Dennoch gab es große Akzeptanzprobleme, und so wurde erst 1770 der erste Blitzableiter in Deutschland errichtet [HS 2009].

1.2. Problemstellung

Seit der Einführung des klassischen Blitzschutzes durch Benjamin Franklin hat sich an seiner Schutzempfehlung qualitativ nicht viel verändert. Auch heute werden Fangstangen an eine verteilte Ableitung und ein Erdungssystem angeschlossen, um den Blitz einzufangen und den Blitzstrom sicher im Erdreich zu verteilen. Diskussionen entwickelten sich jedoch darüber, wie die Fangstangen anzuordnen seien und wie diese beschaffen sein sollten, nachdem 1777 ein Blitz eine Blitzschutzeinrichtung verfehlte [Bod 1778]. 1794 wurden dann die ersten „Vorschriften zur Blitzableitung“ in Deutschland veröffentlicht [Has 1989]. In den vergangenen Jahrzehnten sind internationale ([IEC 62305-1], [IEC 62305-2], [IEC 62305-3]) und in der Folge nationale ([DIN EN 62305-1], [DIN EN 62305-2], [DIN EN 62305-3]) Normen entstanden, welche die Anwendung des äußeren und inneren Blitzschutzes beschreiben.

Die Normen geben Blitzschutz-Empfehlungen, welche den aktuellen Stand des Wissens wiedergeben. Dieser Wissensstand wird durch die Vermessung von Blitzentladungen auf der ganzen Welt vorangetrieben und ständig erweitert [Ber 2003], [Rub 2009], [DZP 2011], [Vis 2012], [Jan 1997]. Die wohl bekanntesten und umfangreichsten Messungen von Abwärtsblitzen wurden durch Karl Berger auf dem Monte San Salvatore durchgeführt [Ber 1975]. Hier hat sich auch gezeigt, dass es, unmittelbar bevor ein Blitz die Erde erreicht, zu Fangentladungen kommt. Diese Fangentladungen bewegen sich auf den Erdblitz zu. Diejenige Fangentladung, welche den Blitz als erstes erreicht, definiert dabei den Einschlagpunkt am Boden. Die Distanz zwischen diesem Punkt und dem Leitblitzkopf zum Zeitpunkt der Entstehung, wird Enddurchschlagstrecke genannt und variiert üblicherweise zwischen 10 m und 100 m. Da Blitze mit einem höheren Bedrohungspotential auch größere Enddurchschlagstrecken aufweisen, nutzt der äußere Blitzschutz diesen Zusammenhang, um

Fangeinrichtungen zu positionieren [HS 2009].

In den vergangenen Jahrzehnten ist die Idee entstanden, die Fangentladungsentstehung künstlich zu beeinflussen [GFM 1998], [Gum 1990]. Hierbei werden im Wesentlichen zwei Ansätze verfolgt. Bei dem ersten Ansatz soll die Fangentladung früher entstehen, als dies an einer gewöhnlichen Fangstange der Fall ist, und somit den Schutzbereich der Fangeinrichtung vergrößern. Hier spricht man von einem Early Streamer Emission (ESE)-Device oder Early Streamer Emission Air Terminal (ESEAT). Bei einem zweiten Ansatz soll die Bildung einer Fangentladung unterbunden werden, um somit den Einschlag an einem empfindlichen Gebäudeabschnitt zu vermeiden. In diesem Fall ist die Rede von einem Dissipation Array System (DAS) oder Charge Transfer System (CTS) [UR 2002]. Für beide Ansätze lassen sich qualitativ plausible Erklärungen zur Funktionsweise finden. Die Argumentationen sind im Wesentlichen auf die Erkenntnisse der Les Renardières-Gruppe zurück zu führen. Diese Gruppe führte in den 19070er Jahren Untersuchungen an Leitblitzentladungen mit großen Schlagweiten in einer eigens errichteten Hochspannungshalle der Électricité de France (EDF) durch [Gro 1972], [Gro 1977], [Gro 1981]. Bei den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass der Entstehung von positiven Leitblitzen, welche natürlichen Fangentladungen sehr ähnlich sind, kleinste Vorentladungen vorausgehen.

Die neuen Fangstangen erzeugen künstliche Vorentladungen, welche die Fangentladungsentstehung unterstützen und so zu einem größeren Schutzraum führen sollen [Cha 1998]. Für den Anwender ergaben sich hieraus ökonomische, technische und ästhetische Vorteile, denn ein projektieter Schutz sei mit einer geringeren Anzahl an Fangstangen realisierbar, als dies mit gewöhnlichen Fangstangen der Fall sei.

Der proklamierte Schutzraum kann jedoch methodisch nicht validiert werden. Von wissenschaftlicher Seite wird der projektierte Vorteil der neuen Blitzschutzkonzepte sogar stark angezweifelt. Im Zentrum der Debatte steht die Frage, ob theoretische Betrachtungen, Laborexperimente oder Einzelbeobachtungen auf die Fangentladungsentstehung in die Natur extrapoliert werden können [Hea 1993], [Cha 1998], [All 1998], [NSB 2001], [Chr 2003], [Ris 2003], [ME 2004], [HR 2006], [CT 2007], [BC 2008].

Die immer weitere Verbreitung von unkonventionellen Blitzschutzsystemen auf der ganzen Welt und die zunehmenden Bemühungen der Hersteller, diese Technologie in den nationalen und internationalen Normen zu verankern und damit zu legitimieren, wirft die Frage nach der moralischen Verantwortung auf [HR 2000]. Sie

zwingt Forscher seit Jahren, sich mit der Problematik der Vorentladungen und der Frage nach der Wirkungsweise und den proklamierten Vorteilen der ESE-Devices auseinander zu setzen [Noa 1999], [Mou 2014].

Die Diskussion über die Effektivität von Blitzschutzanlagen hat jedoch auch gezeigt, dass die genormten Schutzwinkel-, Gitter- und Blitzkugelverfahren die Effektivität einer Fangstange überhaupt nicht berücksichtigen. Es wird nicht berücksichtigt, dass die Entstehung einer erfolgreichen Fangentladung von einer Vielzahl von Parametern (Kontur, Luftdruck, Temperatur, Luftfeuchte ...) und nicht nur dem Blitzstromscheitel abhängt. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen legen die Vermutung nahe [Lu 2015], dass Fangstangen und spitze Objekte im Allgemeinen Fangentladungen früher initiieren, entweder aufgrund ihrer exponierten Lage [KSM 2011] oder der feldüberhöhenden Wirkung [Gum 1990]. Das Wissen über die Entstehung von natürlichen Fangentladungen unter Einfluss eines herannahenden Abwärtsblitzes ist noch sehr gering, da der messtechnische Aufwand äußerst anspruchsvoll und die Aussicht auf reale Messergebnisse sehr gering ist.

1.3. Struktur der Arbeit

Die Arbeit stellt in Kapitel 2 zuerst die wesentlichen theoretischen Hintergründe vor, um die Begrifflichkeiten zu klären. In Kapitel 3 wird der aktuelle Stand des Wissens über die Fangentladungsentstehung und den unkonventionellen Blitzschutz zusammengetragen. Hierbei werden auch Untersuchungen zur Plausibilität der unkonventionellen Blitzschutzkonzepte zusammengefasst.

Da die Technologie schon seit Jahrzehnten in der öffentlichen Kritik steht und es eine Vielzahl von Veröffentlichungen zu diesem Thema gibt, präzisiert Kapitel 4 das Dilemma, in dem sich die Wissenschaft befindet, und zeigt einen umsetzbaren Lösungsweg auf. Aus ihm werden nun die konkreten Ziele dieser Arbeit und die nötigen Arbeitspakete abgeleitet. Da jedoch noch einige Jahre Messungen gesammelt werden müssen, kann die Arbeit den eigentlichen Konflikt noch nicht auflösen. Kapitel 5 zeigt anhand der theoretischen Betrachtung zur Entwicklung des kritischen Volumens, weshalb es wichtig ist die Blitzfangstange in der Natur und nicht im Labor zu beobachten. Hier wird gezeigt, worin die Unterschiede zwischen dem Labor und

der Natur liegen.

Danach soll in Kapitel 6 das Messkonzept vorgestellt werden, mit dem es möglich ist, die Fangentladungsentstehung mit einem realistischen finanziellen, konstruktiven und methodischen Aufwand zu untersuchen. Es schließt sich das Kapitel 7 an, in dem Implementierung und Verifikation einer leistungsstarken und zugleich kostengünstigen Messeinrichtung beschrieben wird. Im vorletzten Kapitel 8 wird ein neues Simulationswerkzeug, das DEGM auf eine ganz neue Art und Weise umgesetzt und analytisch verifiziert. Die so entstandene Weiterentwicklung, das eDEGM, kann hochkomplexe CAD-Objekte und seine Einzelteile auf ihre Einfangwirksamkeit hin untersuchen, Einfangflächen berechnen und individuelle Histogramme über Stromscheitel und Enddurchschlagstrecken ermitteln. Hiermit werden Aussagen über die optimale Beschaffenheit von Aufstellorten für Blitzfangstangen abgeleitet, um eine maximale Anzahl von Blitzereignissen erfassen zu können.

Das letzte Kapitel 9 fasst alle gewonnen Erkenntnisse zusammen und diskutiert zukünftige Schritte. Diese Arbeit soll damit einen Weg aufzeigen, welcher zu einem besseren Verständnis der Fangentladungsentstehung beiträgt, denn nur so kann die Debatte um die Effektivität von Fangstangen aufgelöst und zukünftig ein effektiver Blitzschutz projiziert werden.

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel sollen die grundlegenden Sachverhalte, die zum Verständnis dieser Arbeit nötig sind, dargestellt werden. Da es in der Blitzforschung sehr viele Begrifflichkeiten gibt, die immer wieder in einem falschen Kontext verwendet werden, sollen jedoch zunächst die wesentlichen Begrifflichkeiten vorgestellt werden.

- **Generationenmechanismus (Townsend)** Er erklärt das Durchschlagverhalten in Gasen bei niedrigen Drücken und Schlagweiten, in homogenen Anordnungen. Der Durchschlagskanal baut sich mit der Bewegungsgeschwindigkeit von Elektronen auf und benötigt in der Regel mehrere Lawinen.
- **Kanal (Streamer)** Er bezeichnet den Aufbau einer Lawine, die in ihrem Kopf eine Elektronenzahl von $1 \cdot 10^8 e^-$ bis $1 \cdot 10^9 e^-$ übersteigt und so eine feldverzerrende Wirkung auf das Hintergrundfeld ausübt. Über den Prozess der Rekombination und Photoionisation wächst die Lawine mit annähernd Lichtgeschwindigkeit. Es kommt jedoch nicht zur Thermoionisation. Zwar besitzen Streamer immer einen negativen Lawinenkopf, es ergeben sich aber Unterschiede, wenn der Bereich der höchsten Feldstärke positiv oder negativ ist. Abbildung 3.2 erklärt den Aufbau des positiven Streamers.
- **Kanalmechanismus (Streamermechanismus)** Er erklärt das Durchschlagverhalten in Gasen bei höheren Drücken und Schlagweiten von einigen Metern, in homogenen und inhomogenen Anordnungen. Die gesamte Durchschlagstrecke wird nach dem Zusammenwachsen mehrerer Streamerkanäle nahezu gleichzeitig über die gesamte Schlagweite ionisiert.

- Leitblitz, Vorläuferblitz oder Leitentladung (Leader) Der Leitblitz besteht aus dem Leitblitzkanal, welcher thermoionisiert und hoch leitfähig ist, dem Leitblitzkopf, in welchem sich ein Großteil der Ladung des Leitblitzes befindet, und der Leitblitzkorona, um welche sich positive Streamer bis zur Ionisationsgrenze ausbilden können. Positive und negative Leitblitze weisen ein sehr unterschiedliches Entladungsverhalten auf.
- Leitblitzmechanismus (Leadermechanismus) Er erklärt das Durchschlagverhalten in Gasen bei sehr großen Schlagweiten. Im Unterschied zu den anderen Durchschlagmechanismen setzt die Thermoionisation bereits ein, bevor die Entladung eine Gegenelektrode erreicht hat.

Von diesen Begrifflichkeiten sind viele Begriffe der Blitzforschung abgeleitet. Für die Fangentladung werden in der Literatur Begriffe wie *Connecting Leader*, *Upward Connecting Leader*, *Upward Leader* oder sogar *Upward Streamer* verwendet. Die letzte Begrifflichkeit wird an einigen Stellen entweder falsch benutzt oder meint eine abgebrochene Fangentladung.

2.1. Natürliche Blitzentladungen

Gewitterentladungen entstehen in der Erdatmosphäre und sind üblicherweise durch Cumulonimbuswolken, durch Vulkaneruptionen oder durch Staub- und Schneestürme bedingt. Die in unseren Breiten häufigste Ursache für Gewitter sind Cumulonimbuswolken. Sie entstehen in Folge von Luftmassengewittern, Frontgewittern oder orographischen Gewittern. Die Gewitter werden dabei nach ihrer Struktur, Lebensdauer und Ausdehnung in Einzelzellen, Multizellen oder sogar Superzellen unterteilt. Die Elektrifizierung einer einzelnen Cumulonimbuswolke erfolgt nach aktuellem Kenntnisstand über mikrophysikalische Wolkenprozesse [Coo 2014].

Auf die elektrisch geladenen Niederschlagspartikel wirken dabei elektrische Kräfte, Gravitation und Konvektion, wodurch eine großräumige Ladungstrennung entsteht. Einzelzellen können vereinfacht auf eine Di- oder Tripolstruktur zurückgeführt werden, wobei sich im Zentrum eine negative Ladung findet, welche etwa betragsgleich im oberen Bereich der Wolke als positive Ladung zu finden ist. Im unteren Bereich

sammelt sich zudem eine zusätzliche kleine positive Raumladung [RU 2003].

Bei den Blitzentladungen unterscheidet man zwischen den Wolkeblitzen (Cloud to Cloud (CC)) und den Erdblitzes (Cloud to Ground (CG) und Ground to Cloud (GC)). Die Wolkeblitze lassen sich in innere Wolkenentladungen, Luftentladungen und Zwischenwolkenentladungen unterscheiden. Die für den Blitzschutz maßgeblichen Entladungen sind jedoch die Erdblitzes, welche sich in Auf- und Abwärtsblitzes sowie negative und positive Blitzentladungen unterscheiden lassen. Eine schematische Darstellung dieser vier Typen zeigt Abbildung 2.1 [HS 2009].

Die negativen Abwärtsblitzes stellen in Deutschland mit einer Anzahl von über 90 % die Mehrheit der Entladungen dar. Sie entstehen im Reifestadium der Gewitterwolke und bauen das negative Ladungszentrum ab. Erst gegen Ende eines Gewitters, im Zerfallsstadium, können auch positive Blitzes die Erde erreichen.

Aufwärtsblitzes sind eine Sonderform der Blitzentladungen, da sie erst bei freistehenden Strukturen mit einer Höhe von über 100 m zu erwarten sind. Auch hier ist der negative Aufwärtsblitz¹ mit einem Anteil von 95 % die dominierende Blitzform [HS 2009].

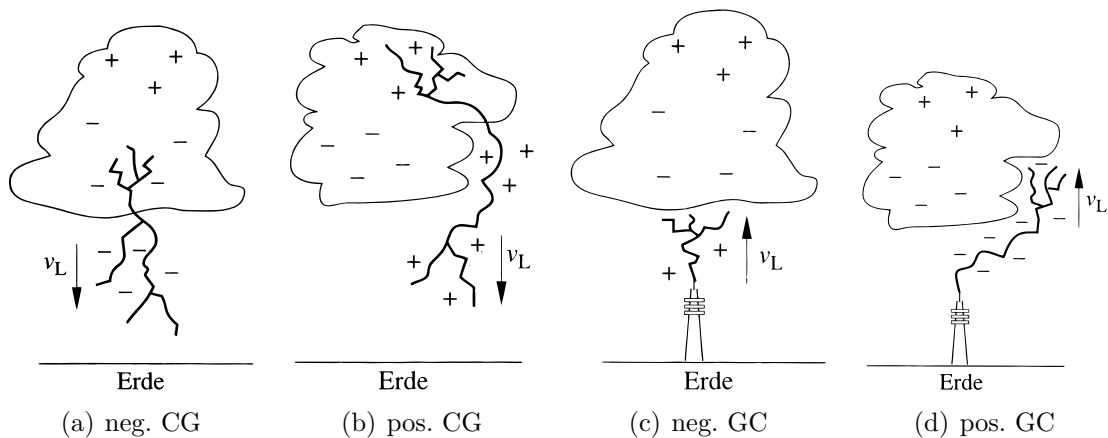


Abbildung 2.1.: Schematische Darstellung der vier Blitztypen mit Erdberührung [HS 2009]

Die jeweiligen Blitztypen unterscheiden sich dabei in ihrer Erscheinung stark, was den Ladungstransfer, die Anzahl der Folgeblitzes und ihr generelles Vorwachsverhalten angeht.

¹ Für die Terminologie von negativen und positiven Blitzes ist immer der Ladungstransfer zur Erde maßgebend, weshalb der negative Aufwärtsblitz ein positiver Leitblitz ist.

2.1.1. Abwärtsblitze

Feldmessungen haben ergeben, dass Abwärtsblitze durch einen Durchschlagprozess in der Wolke eingeleitet werden, welcher als Preliminary Breakdown (PB) bezeichnet wird. Umstritten ist hierbei, wie es zu diesem Durchschlag kommt, denn die lokalen Feldstärken sind eine Größenordnung zu klein. Es wird angenommen, dass der Durchschlag zwischen der negativen Hauptladung und der unteren positiven Ladung entsteht. Dieser Prozess führt zu einer Ladungssäule, welche als Leitblitz bezeichnet wird. Im Falle eines negativen Leitblitzes wächst sie mit einer Geschwindigkeit von etwa $2 \cdot 10^5 \text{ m s}^{-1}$ schrittweise gegen Erde und wird auch Vorläuferblitz genannt (im engl. Stepped Leader (SL)). Die Schrittweite beträgt dabei einige zehn Meter, und die Schrittdauer beträgt etwa $1 \mu\text{s}$. Die Zeitdifferenz zwischen den einzelnen Vorwachsschritten kann Werte von $20 \mu\text{s}$ bis $50 \mu\text{s}$ annehmen. Je weiter sich diese Entladung dabei der Erde nähert, desto mehr wird die Feldstärke am Boden angehoben. Sobald nur noch wenige hundert Meter verbleiben, wird die Durchbruchfeldstärke (etwa 30 kV cm^{-1}) von Luft überschritten, und es kommt an Objekten auf der Erde zu Entladungen. Diese Entladungen können zu einer Fangentladung führen. Der Entstehungsprozess jedoch ist nur unzureichend erklärt. Fangentladungen wachsen nun dem Leitblitz entgegen. Sobald die Fangentladung die Koronazone des abwärtsgerichteten Vorläuferblitzes berührt, kommt es zum Final Jump (FJ). Diejenige Fangentladung, welche dies zuerst schafft, definiert den Punkt am Boden, welcher vom Blitz getroffen wird. Die Distanz zwischen dem Kopf des Leitblitzes zum Zeitpunkt, an dem die erfolgreiche Fangentladung startet, und dem Punkt, von dem die erfolgreiche Fangentladung ausgeht, wird Enddurchschlagstrecke genannt. Sobald es zum FJ kommt, wird die im Leitblitz gespeicherte Ladung sukzessive vom Erdboden aus neutralisiert. Es fließt ein Strom, welcher den Plasmakanal auf etwa $3 \cdot 10^4 \text{ K}$ aufheizt und aufleuchten lässt. Dieses Ereignis wird als Hauptblitz (Return Stroke (RS)) bezeichnet. Der Stromfluss im Plasmaschlauch dauert einige Mikrosekunden lang an. In einigen Fällen kann der Stromfluss sogar für einige Millisekunden bestehen bleiben. Im Anschluss können sich Folgeblitze (Subsequent Return Stroke (SRS)) ausbilden, die sich entweder in den noch leitfähigen Plasmakanal entladen² oder einen neuen Fußpunkt an einer anderen Stelle bilden³. Eine

² Hier ist ein Dart Leader (DL) vorausgegangen, welcher die gesamte vorionisierte Entladestrecke des Hauptblitzes nutzt.

³ Hier ist ein Dart Stepped Leader (DSL) vorausgegangen, welcher nur einen Teil der vorionisierten Strecke des Hauptblitzes nutzt und im unteren Bereich einen eigenen Weg zur Erdberührung sucht.

Übersicht über typische Parameter negativer Wolke-Erde-Blitze sind in Tabelle 2.1 zu finden.

Neben den negativen Abwärtsblitzen gibt es auch positive Abwärtsblitze, die sich stark voneinander unterscheiden. Bei positiven Abwärtsblitzen sind Stromscheitel von über 300 kA dokumentiert. Sie finden in der überwiegenden Zahl der Fälle nur als Einzelentladung statt. In der Regel kommt es hierbei zu einem kontinuierlichen Vorwachsen. Der Ladungstransfer des positiven Erstblitzes kann bis zu einigen hundert Millisekunden andauern, was zu Ladungstransfers von bis zu 1000 C führt [MSS 1992]. Ihre Seitenäste können bis zu 10 km lang werden [Rak 2003]. Die vorgestellte Erklärung stellt den anerkannten Stand des Wissens dar. Für weiterführende Informationen werden die folgenden Literaturquellen empfohlen: [Has 1989], [RU 2003], [HS 2009], [CoK 2013] und [Coo 2014].

Tabelle 2.1.: Charakterisierung typischer Parameter des Erstblitzes von negativen Wolke-Erde-Blitzen [RU 2003]

Parameter		typische Werte
Vorläuferblitz	Schrittweite	50 m
	Schrittintervall	20 μs bis 50 μs
	Vorwachsengeschwindigkeit	$2 \cdot 10^5 \text{ m s}^{-1}$
	Gesamtdauer	35 ms
	Gesamtladung	5 C
	Gesamtpotential	50 MV
	Kanaltemperatur	10 000 K
Hauptblitz	Scheitelstrom	30 kA
	Max. Steilheit	10 kA μs^{-1} bis 20 kA μs^{-1}
	Stirnzeit (10 % bis 90 %)	5 μs
	Rückenhalfwertzeit	70 μs bis 80 μs
	Ladungstransfer	5 C
	Vorwachsengeschwindigkeit	$1 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ bis $2 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$
	Kanaltemperatur	30 000 K

2.1.2. Aufwärtsblitze

Aufwärtsblitze sind nur an alleinstehenden hohen Objekten mit einer Höhe von mindestens 100 m zu erwarten. Sie sind eine Folge der starken inhomogenen Spitzenwirkung der hohen Struktur und der Tatsache, dass die Hintergrundfeldstärke nicht durch Sprühladungen in Bodennähe reduziert wird. Wie die Blitzentla-

dung jedoch ausgelöst wird, ist nicht hinreichend geklärt. Auslöser können die ansteigende Wolkenladung selber sein oder sehr schnelle Feldänderungen in Folge von nahen Wolke-Wolke-Blitzen [AC 2014b]. Durch die große Verbreitung von Windenergieanlagen (WEAs) in den letzten Jahrzehnten gewinnen Aufwärtsblitze immer mehr an Bedeutung [Die 2015], [Mar 2015].

Dabei kommt es bei Aufwärtsblitzen zu einem langanhaltenden Dauerstrom, dem Initial Continuing Current (ICC), der jedoch nur einige hundert Ampere beträgt. Er versorgt den wachsenden Leitblitz mit Ladungsträgern. Während des Vorwachsens kann es immer wieder zu kleineren Stoßströmen kommen, die als ICC-Impulse bezeichnet werden. Diese Stoßströme sind oft nicht höher als 2 kA. Nur wenn der Aufwärtsblitz das Ladungszentrum der Wolke erreicht, kann es zu einem Hauptblitz kommen, was jedoch nicht immer eintritt. Man spricht hierbei von No Return Stroke (NRS)-Blitzen. Sie sind von Ortungssystemen (Lightning Detection Network (LDN)) kaum erkennbar [Die 2005]. Aufwärtsblitze lassen sich sehr gut an hohen Türmen untersuchen, was in unseren Breiten in Deutschland (Hoher Peissenberg), in Österreich (Gaisberg) und in der Schweiz (Mt. Säntis) erfolgreich getan wird [Ber 2003], [Rub 2009], [DZP 2011].

2.1.3. Fangentladung

Fangentladungen (Connecting Leader (CL)) sind Leitblitze, die vom Boden aus Abwärtsblitzen entgegen wachsen und einige zehn bis hundert Meter lang werden können. Meistens starten mehrere Fangentladungen gleichzeitig, wovon jedoch nur eine erfolgreich ist und den eigentlichen abwärts gerichteten Leitblitz erreicht. Als Startpunkt für Fangentladungen sind vor allem sehr exponierte Punkte zu nennen, da diese aufgrund ihrer Spitzenwirkung eine Feldüberhöhung bewirken. Wie Abbildung 2.2.a illustriert, definiert die erfolgreiche Fangentladung zum Zeitpunkt ihres Beginns am Punkt P zum Leitblitzkopf am Punkt M die Enddurchschlagstrecke r .

Heutige Hochgeschwindigkeitskameras sind in der Lage, den Prozess des Vorwachsens der Fangentladung zeitlich zu erfassen [Lu 2011], [Lu 2012], [Lu 2015]. Abbildung 2.2.b zeigt die Entwicklung einer Fangentladung, welche einem sehr verästelten und abwärts gerichteten Vorläuferblitz entgegenwächst. Hierbei ergeben sich Abweichungen von der idealisierten Vorstellung, sowohl was den Vorläuferblitz, als auch was die Fangentladung angeht.

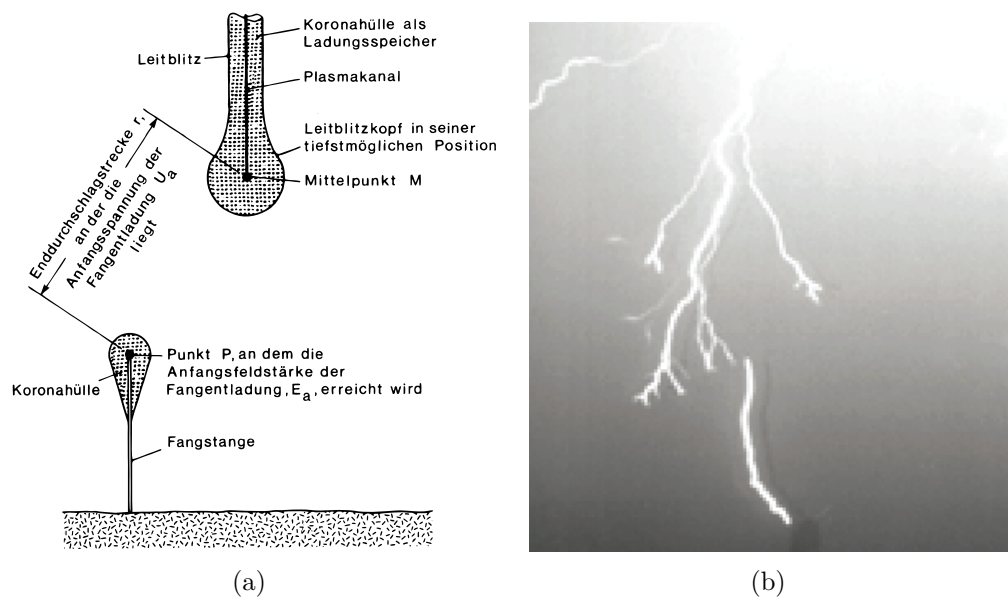


Abbildung 2.2.: a) Schematische Darstellung der Situation unmittelbar vor dem Enddurchschlag [Has 1989] und b) Hochgeschwindigkeitsaufnahme einer realen Fangentladung in Guangzhou vom 18. Juli 2011 [Lu 2012]

Welche Bedingungen für die Entstehung einer erfolgreichen Fangentladung erfüllt sein müssen, ist noch immer nicht geklärt. Untersuchungen haben gezeigt, dass eine einfache Entladung in Luft noch nicht ausreicht. Es muss ein Leitblitz entstehen, der zusätzlich in der Lage sein muss, dem Vorläuferblitz entgegen zu wachsen. Vor-entladungen leiten hierbei die Entstehung ein, können sie jedoch auch verzögern [AC 2001]. Verschiedene Konzepte und Modelle versuchen die Entstehung erfolgreicher Fangentladungen abzubilden. Die bekanntesten Konzepte sind:

- „Kritisches Radius“- und „Kritisches Streamer Längen“-Konzept von Carrara und Thione [CT 1976]
- Allgemeine Leitblitzentstehungsgleichung von Rizk [Riz 1989]
- Stabilisierte Feldgleichung von Lalande [Lal 2002]
- Leitblitzentstehungsmodell von Becerra und Cooray: „Self Consistent Leader Inception Modell (SLIM)“ [Coo 2010a]

Das ambitionierteste Modell ist das Self Consisting Leader Inception Modell (SLIM)-Modell. Es ist gleichzeitig auch das komplexeste der bekannten Modelle. Hier werden die Geschwindigkeit, die Ladungsverteilung im Vorläuferblitz je Längeneinheit, die injizierten Ströme und die Feldstärken bei jedem Berechnungsschritt neu bestimmt. Jedoch ist auch dieses Modell nur in Laboruntersuchungen und an einigen wenigen künstlich ausgelösten Blitzen überprüft worden. Ein Hauptkritikpunkt sind die Annahmen zum Ladungsinhalt der Koronaentladungen [Bec 2012].

2.1.4. Enddurchschlagstrecke

Es ist allgemein anerkannt, dass die Länge der Enddurchschlagstrecke r in einem direkten Zusammenhang mit der Ladung Q des Vorläuferblitzes steht, denn eine höhere Ladung im Vorläuferblitz ist auch mit einem höheren elektrischen Potential Φ verknüpft. Ein höheres Potential ist in der Lage, die Randfeldstärke an weiter entfernten, auf der Erde befindlichen Objekten zu erhöhen. Die im Vorläuferblitz gespeicherte Ladung bestimmt zum Zeitpunkt des Einschlages den Ausgleichstrom und damit auch den Stoßstromscheitel I_p . Aus dieser Kausalitätskette wurden verschiedene empirische Gleichungen abgeleitet, die den Stoßstromscheitelwert mit der Enddurchschlagstrecke in Beziehung setzen. In der internationalen Normung hat sich der Zusammenhang aus Gleichung 2.1 durchgesetzt [DIN EN 62305-1]. Eine Vielzahl weiterer empirischer Zusammenhänge zeigt Abbildung 2.3. Eine wesentliche Triebkraft ist der Wunsch, Freileitungen vor Einschlügen zu schützen, weshalb viele Autoren auch zwischen den Enddurchschlagstrecken zu den Leiterseilen r_c (Conductor) und der Erde r_g (Ground) differenzieren. Es wird deutlich, wie wenig der Zusammenhang erforscht ist und wie wenig man über die Einflussparameter weiß, denn die Erkenntnisse beruhen oft auf zweidimensionalen Beobachtungen an verschiedenen Objekten und an sehr unterschiedlichen Orten [Dor 2015].

$$r = 10 \cdot I_p^{0,65} \quad (2.1)$$

$$I_p \quad \text{in kA}$$

$$r \quad \text{in m}$$

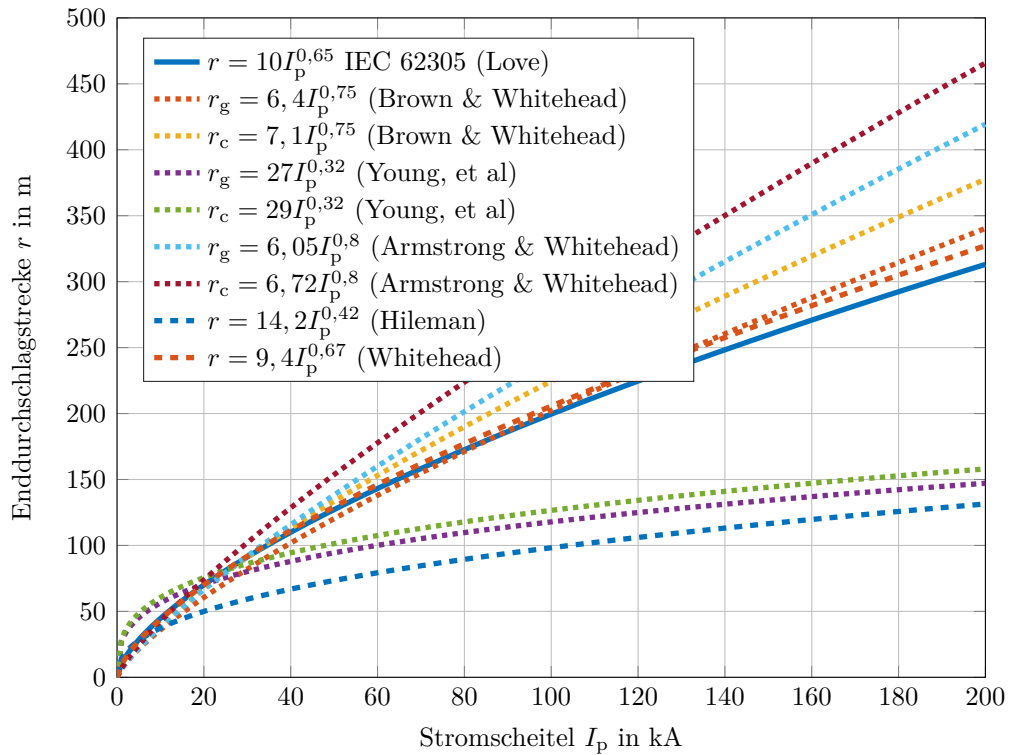


Abbildung 2.3.: Zusammenhang von Enddurchschlagstrecke r und Stromscheitel I_p nach IEC 62305 [IEC 62305-1] und verschiedenen weiteren Veröffentlichungen

2.2. Messen von Blitzströmen

Um Stoßströme mit hohen Amplituden von bis zu 200 kA zu messen, werden niederohmige Messwiderstände oder Messspulen mit und ohne Magnetkern eingesetzt. Messwiderstände liefern eine dem Strom, Messspulen eine der zeitlichen Ableitung des Stromes proportionale Messspannung. Um beim Einsatz von Messspulen eine dem Strom proportionale Messspannung zu erzeugen, muss die Messspannung integriert werden.

Weitere Messmethoden nutzen zum Beispiel den Hall-Effekt oder den Faraday-Effekt. Sie sind vor allem in der Messung von Gleich- und Wechselströmen bis 10 kA erprobt. Wichtige Faktoren zur Wahl eines entsprechenden Strommesssystems sind die Bandbreite und die Art der Installation in einem Messkreis. Je nachdem, welche Messmethode gewählt wird, kann es zu konstruktiven Beeinflussungen kommen, die

man jedoch weitestgehend eliminieren kann. Beispielsweise kann durch einen ko-axialen Aufbau bei Messwiderständen die induktive Beeinflussung reduziert werden [Sch 2010].

2.2.1. Messkonzepte zur Blitzstromerfassung

Generell ist es immer wünschenswert, nicht nur den Blitzstrom so genau wie möglich zu erfassen, sondern auch jedwede Daten, die mit dem Blitzereignis in Verbindung zu bringen sind. Hierbei ist man mit der Tatsache konfrontiert, dass das zu erfassende Ereignis Komponenten mit stark streuenden und von einander abweichenden Amplituden und Amplitudenänderungen besitzen kann. Das Blitzereignis besteht dabei aus Stoßstromkomponenten im Mikrosekundenbereich, was einer hohen Bandbreite und Auflösung bedarf, und kann aus verschiedenen Teilblitzen, die in Intervallen von einigen hundert Millisekunden auftreten, bestehen, wofür eine hohe Speichertiefe benötigt wird. Viele Messeinrichtungen nutzen daher verschiedene Sensoren, um die unterschiedlichen Blitzstromkomponenten aufzulösen. Die wohl derzeit leistungsstärkste Blitzmesseinrichtung ist am hohen Peißenberg in Deutschland installiert. Solche Messsysteme zur Blitzstromerfassung sind jedoch in der Regel sehr teuer, weshalb man sich genau überlegt, wo die Ausbeute an Messungen besonders groß sein wird. Diese Systeme sind daher feste Installationen in frei stehenden Masten oder Türmen. Zu Beginn der Blitzstromforschung wurden oft Shunts eingesetzt, da sie eine sehr hohe Bandbreite besitzen und nur geringen Störeinflüssen unterworfen sind. Erst in den letzten Jahrzehnten werden immer häufiger Rogowski-Spulen zur Blitzstrommessung eingesetzt. Das induktive Messprinzip ist mittlerweile in der Lage, untere Grenzfrequenzen von einigen Millihertz und obere Grenzfrequenzen von einigen zehn Megahertz zu erfassen. Hier steigen vor allem die Herausforderungen an das Integrationsglied. Darüber hinaus wurden weitere Messprinzipien genutzt, wie magnetische Stäbchen, welche Auskunft über den Blitzstromscheitelwert geben. Mit dieser sehr einfachen und kostengünstigen Methode konnte eine Vielzahl von Messungen durchgeführt werden [Pop 1990]. Erst in den letzten Jahren nutzt ein Messsystem den Faraday-Effekt, um Blitzströme zu erfassen [WK 2014].

Nicht über alle Messsysteme liegen Daten vor, was ihre Bandbreite und die gemessenen Ereignisse angeht. In Tabelle 2.2 sind die bekanntesten Messeinrichtungen und ihre Ausbeute hinsichtlich der Abwärtsblitze aufgeschlüsselt.

Die in der Tabelle aufgeführten Daten sind verschiedenen Veröffentlichungen entnommen und stellen teilweise nur Messperioden dar. Die einzelnen Einrichtungen sind immer wieder Revisionen unterzogen worden und haben ihre Messdatenerfassung immer wieder angepasst und verbessert. Die Messperioden betragen in der Regel 3 Jahre bis 20 Jahre und können immer wieder unterbrochen worden sein. Man erkennt starke Unterschiede hinsichtlich des Auftretens von Abwärtsblitzen im Vergleich zu den Aufwärtsblitzen. Dabei weisen vor allem die drei jüngsten, europäischen Messeinrichtungen in Deutschland, Österreich und der Schweiz nur sehr geringe Fangraten für Abwärtsblitze aus. Der Grund hierfür könnte darin liegen, dass die Einrichtungen sehr genau arbeiten und gut zwischen Auf- und Abwärtsblitzen differenzieren können. Die Unterscheidung, ob ein Blitz ein Auf- oder Abwärtsblitz gewesen ist, lässt sich nur fotografisch oder anhand des Stromverlaufs klären. Für die fotografische Ermittlung muss die Wachstumsrichtung des Blitzes erkannt werden, was aufgrund von Überbelichtungen oder schlechtem Wetter nicht immer möglich ist. Für die Ermittlung aus dem Stromverlauf muss der initiale Dauerstrom ICC erkannt werden, der üblicherweise nur einige wenige hundert Ampere beträgt. Vor allem Messwandler, die nach dem Induktionsprinzip arbeiten, können hier Probleme bereiten. Aber auch die Auflösung des Datenerfassungsgerätes kann problematisch sein, denn ein Oszilloskop mit einer Auflösung von 8 Bit könnte einen Messbereich von $\pm 100 \text{ kA}$ nur mit $781,2 \text{ A Bit}^{-1}$ darstellen. Dauerströme würden hier schlicht im Rauschen untergehen. Je höher ein Gebäude ist, desto häufiger ist es selbst ein Verursacher von Aufwärtsblitzen. Jeder Aufwärtsblitz neutralisiert auch Ladung in der darüber liegenden Wolke, woraus die Idee entstanden ist, dass das Auftreten von Abwärtsblitzen durch hohe Strukturen sogar verringert werden kann [Hus 2010]. An einigen Messeinrichtungen, beispielsweise am Monte San Salvatore, kommt es zu einer Vielzahl von Abwärtsblitzen, was heutzutage nur noch schwer nachvollziehbar ist [Smo 2013]. In einigen Fällen, wie beispielsweise am Morro do Cachimbo, bei der ein induktiver Pearsonwandler mit einer unteren Grenzfrequenz von 100 Hz eingesetzt wird, ist es denkbar, dass niederfrequente Anteile, beispielsweise eines beginnenden Langzeitstromes, nicht erfasst werden [Vis 2004].

Tabelle 2.2.: Weltweite Messeinrichtungen an instrumentierten Türmen und Anzahl der erfassten Blitzeinschläge [McE 1939] [GLS 1976] [BG 1984] [Jan 1997] [Die 2005] [DZP 2011] [Vis 2012] [Rom 2012a] [Mik 2014] [Man 2014]

Ort	Stromerfassung	Abwärtsblitze	Aufwärtsblitze
Empire State Building, 1939 New York (USA)	Shunt	4	45
Ostankino TV Tower, 1976 Moskau (Russland)	Shunt und Rogowski-Spulen	1	74
Monte San Salvatore, 1984 Lugano (Schweiz)	Shunt	126	211
Foligno und Monte Orsa, 1984 (Italien)	Shunt	42	67
CN Tower, 1997 Toronto (Kanada)	Rogowski-Spulen	wenige	528
Gaisbergturm, 2011 Salzburg (Österreich)	Shunt	7	815
Morro do Cachimbo, 2012 Belo Horizonte (Brasilien)	Pearsonwandler	48	9
Säntisturm, 2012 Saint Gallen (Schweiz)	Rogowski-Spulen	0	201
Skytreetower, 2014 Tokyo (Japan)	Rogowski-Spule	13	11
Peißenbergturm, 2014 Peißenberg (Deutschland)	Shunt	2	52

Um die Datenbasis negativer Abwärtsblitze zu vergrößern, werden immer wieder Wege gesucht, um mit sehr kostengünstigen Messeinrichtungen die wichtigsten Parameter einer Blitzentladung zu ermitteln. Eine dieser Methoden ist der Einsatz von magnetischen Stäbchen. Sie werden an Objekten angebracht und verändern unter der Einwirkung eines Blitzstromes ihre Magnetisierung [Zor 1998]. Popolansky konnte auf diese Weise in den Jahren zwischen 1959 und 1985 die Stromscheitelwerte von 498 Blitzereignisse registrieren. Hierfür wurden knapp 200 Objekte mit diesen Stäbchen ausgerüstet. Die Objekte waren zwischen 25 m und 140 m hoch, die meisten davon zwischen 50 m und 70 m. Die überwiegende Mehrzahl der hier gemessenen Entladungen müssen Abwärtsblitze gewesen sein [Pop 1990].

2.3. Messen von Vorentladungen

2.3.1. Allgemeine Parameter

Vorentladungen an Fangstangen sind sehr gut mit äußeren Teilentladungen vergleichbar. Allgemein handelt es sich hierbei um elektrische Entladungen, welche die Isolation zwischen zwei Leitern mit unterschiedlichem Potential nur teilweise überbrücken. Für die Entstehung dieser Teilentladungen ist die Überschreitung der lokalen elektrischen Festigkeit im jeweiligen Isolierstoff eine Voraussetzung. Neben optischen und akustischen Wirkungen kommt es bei Teilentladungen zu unipolaren elektrischen Stromimpulsen mit typischen Anstiegszeiten von 1 ns bis 5 ns. Die Impulsdauern liegen im Bereich von 5 ns bis 20 ns [Kön 1993].

Die Teilentladungsmessung stellt heute einen sehr wichtigen Bestandteil der dielektrischen Diagnostik zur Zustandsbewertung von hochspannungstechnischen Betriebsmitteln dar. In den letzten Jahren sind viele ausgeklügelte Analysewerkzeuge entstanden, um Teilentladungsquellen zu klassifizieren. Hierbei sind vor allem das Phase Resolved Partial Discharge (PRPD), das 3-Channel Frequency Relation Diagram (3CFRD) und die Puls-Sequenz Analyse (PSA) zu nennen [Küc 2009], [Ret 2009], [Hoo 1997].

2.3.2. Ladungsermittlung

Heutige Teilentladungsmesssysteme geben nicht Strom- oder Spannungsamplituden, sondern den Ladungsinhalt der hochfrequenten Ausgleichsströme aus. Theoretisch kann dieser bei sehr breitbandigen Systemen durch die Integration des Stromimpulses im Zeitbereich ermittelt werden. Dies ist jedoch nicht praktikabel, und so wird die Ladung mit einer Quasiintegration im Frequenzbereich berechnet.

Man geht davon aus, dass es sich bei einer Teilentladung um einen Doppelsexponentialimpuls handelt, welcher durch die Gleichung 2.2 beschrieben werden kann. Die Impulse sind durch eine Anstiegszeitkonstante τ_1 , eine Rückzeitkonstante (verantwortlich für die Impulsbreite) τ_2 und einen Scheitelwert \hat{i} charakterisiert.

$$i(t) = \hat{i} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right) \quad (2.2)$$

2. Theoretische Grundlagen

In Abbildung 2.4.a sind exemplarisch drei unterschiedliche Doppel exponentialimpulse mit unterschiedlichen Anstiegs- und Rückenzeiten aber identischem Ladungsinhalt im Zeitbereich dargestellt. Der Ladungsinhalt lässt sich allgemein durch Gleichung 2.3 bestimmen und beträgt bei allen Impulsen $1 \mu\text{C}$.

$$Q = \int i(t) dt \quad (2.3)$$

Die Amplitudendichten der Impulse sind in Abbildung 2.4.b dargestellt.

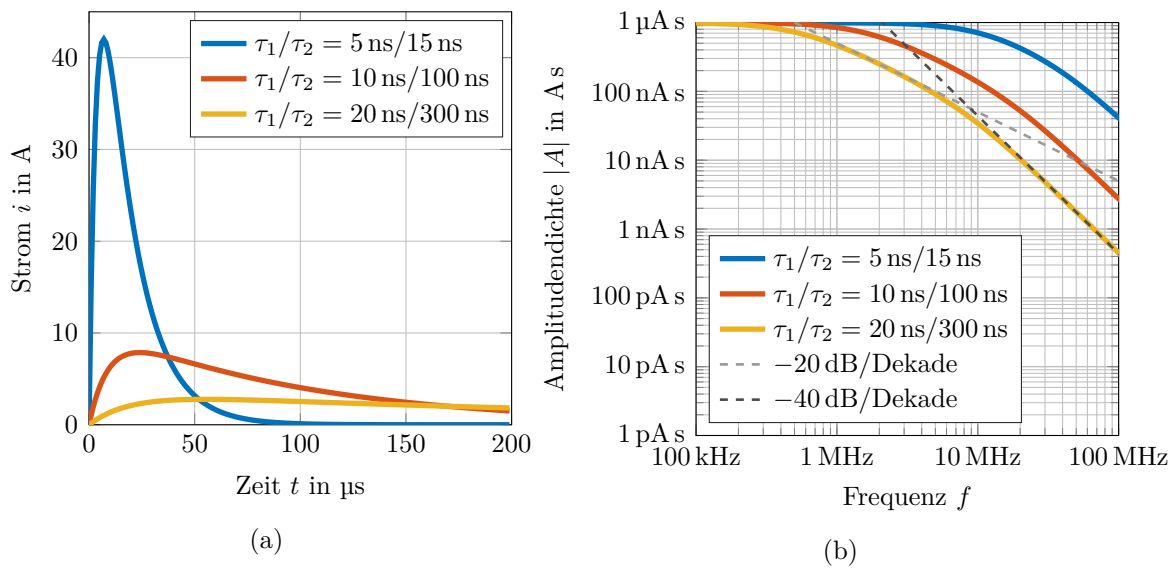


Abbildung 2.4.: Drei Vorentladungsstromimpulse mit einem Ladungsinhalt von je $1 \mu\text{C}$ im Zeitbereich a) und im Frequenzbereich b)

Im doppelt logarithmischen Amplitudendichtespektrum kann man erkennen, dass die Frequenzverläufe über je zwei Grenzfrequenzen verfügen. Diese ergeben sich aus den beiden Zeitkonstanten der jeweiligen Impulse gemäß Gleichung 2.4 und 2.5 [Hab 1992].

$$f_1 = \frac{1}{\pi \tau_1} \quad (2.4)$$

$$f_2 = \frac{1}{\pi \tau_2} \quad (2.5)$$

Allen drei Impulsen ist gemein, dass sie dasselbe konstante Plateau erzeugen, da die Stromzeitfläche gleich ist. In Gleichung 2.6 wird das komplexe Spektrum des

Impulses betrachtet.

$$\mathcal{F}(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} i(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.6)$$

Für $\omega \rightarrow 0$ ergibt sich Gleichung 2.7.

$$Q = \int_0^{+\infty} i(t) dt \quad (2.7)$$

Der Ladungsinhalt des jeweiligen Impulses lässt sich also am Gleichanteil des Impulses bei $f = 0$ Hz ablesen. Da er jedoch bei realen Messungen nicht verfügbar ist, kann man auch bei einer beliebigen Mittenfrequenz f_c auf den Ladungsinhalt schließen, wenn man unterhalb der Grenzfrequenz des jeweiligen Impulses, also im konstanten Plateau, bleibt. Die Norm IEC 60270 gibt für die breitbandige Auskopplung eine untere Grenzfrequenz zwischen 30 kHz bis 100 kHz, eine obere Grenzfrequenz von maximal 1 MHz und eine Bandbreite von 100 kHz bis 900 kHz vor [IEC 60270].

3. Stand des Wissens zur Entstehung von Fangentladungen

Dieses Kapitel soll qualitativ den Wissensstand hinsichtlich der Entstehung positiver Leitblitze beschreiben. Dabei sollen die Begrifflichkeiten klar gemacht und die wesentlichen Erkenntnisse aus den Laboruntersuchungen wiedergegeben werden. Weiterhin wird das Wissen über die unkonventionellen Blitzschutzkonzepte zusammengefasst und nachvollzogen, worauf deren Funktionsweise fußt, und womit sich die wesentlichen Kritikpunkte begründen.

3.1. Simulation von Fangentladungen im Labor

Die Entstehung von Fangentladungen setzt sehr hohe Feldstärken voraus. Die im Labor erzeugten positiven Leitblitze werden maßgeblich durch die angelegte Hintergrundfeldstärke vorangetrieben. Zur Untersuchung von realen Fangentladungen im Labor wären sehr hohe Schlagweiten erforderlich, bei denen sich ein negativer Leitblitz bildet, der durch seinen eigenen Potentialgradienten in der Lage ist, positive Leitblitze, also Fangentladungen, zu erzeugen. Die längsten von Menschen erzeugten Schlagweiten betragen 100 m und können nur sehr kleine Fangentladungen erzeugen [GO 1996]. Diese konnten jedoch nicht genau untersucht werden. Im Labor wird eine Fangentladung als positiver Leitblitz simuliert. Hierbei sind zwei inhomogene Konfigurationen möglich. Zum einen kann eine negative Schaltstoßspannung an eine Plattenelektrode angelegt und die Entwicklung einer positiven Entladung an einer geerdeten Spitzenelektrode herbei geführt werden, und zum anderen kann eine positive Schaltstoßspannung direkt an eine Spitzenelektrode angelegt werden. In beiden Fällen kommt es zu einer Leitblitzentwicklung an der positiven Elektrode.

3. Stand des Wissens zur Entstehung von Fangentladungen

Die bisher umfangreichsten Untersuchungen zur Entstehung positiver Leitblitze fanden in den 1980er Jahren durch die Les Renardières-Gruppe statt. Im Anschluss erfolgten weitere intensive Untersuchungen. Abbildung 3.1 zeigt den prinzipiellen Verlauf der Entstehung einer positiven Leitentladung unter Schaltstoßbeanspruchung. Man erkennt fünf Phasen. In der ersten Phase (a) gibt es keinerlei Aktivitäten. Zum Zeitpunkt T_i bei Spannung U_i kommt es zum Einsatz einer ersten positiven Streamer-Vorentladung. Diese ist jedoch noch nicht in der Lage, so viele Ladungsträger zu erzeugen, dass es zur Thermoionisation kommt. Zurück bleiben aus dieser Entladung positive Ionen, welche die Feldstärke unmittelbar vor der Spitze herabsenken.

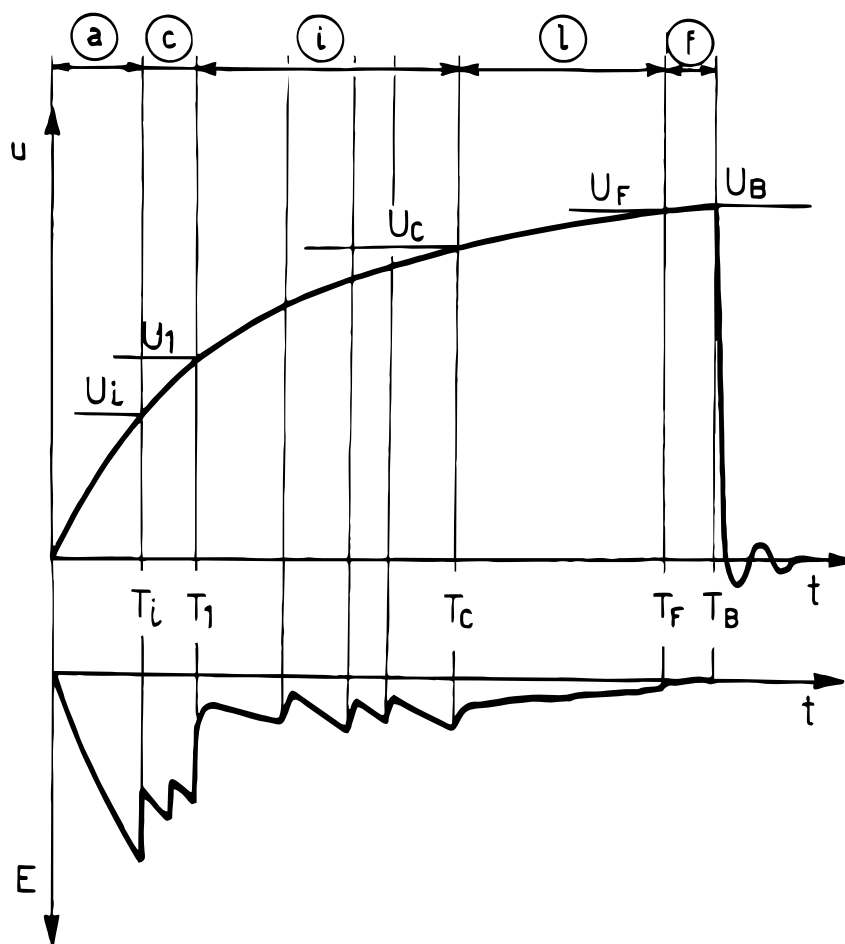


Abbildung 3.1.: Schematischer Verlauf der Entstehung einer positiven Leitentladung unter Schaltstoßbeanspruchung (Oben: Spannungsverlauf, Unten: Feldstärkeverlauf an der Elektrodenspitze) [CT 1976]

Im weiteren Verlauf steigt die Spannung weiter an, und damit vergrößert sich die Zone, in der eine Streamerentladung möglich ist. Es entstehen nun größere Entladungsdistanzen und somit größere Entladungen, die sich vor allem an der Raumladungszone der ersten Streamerentladung vorbei entwickeln. Diese Entladungen werden durch Dunkelzeiten (dark periods), in denen keine Entladungen zu beobachten sind, voneinander getrennt (c). Zum Zeitpunkt T_1 in der Phase (i) schnürt sich die Streamerentladung zu einem Kanal ein, und es bildet sich ein Leitblitzstamm. Sobald die Thermoionisation einsetzt und es zu einem heißen Leitblitzstamm kommt, beginnt die Phase (l) in der ein kontinuierliches Leitblitzwachstum vorliegt. Die Koronazone wächst nun kontinuierlich vor und schnürt sich immer weiter ein. In der letzten Phase (f) erreicht die Koronazone die Gegenelektrode, und es kommt zum Spannungszusammenbruch, welcher auch als Final Jump (FJ) bezeichnet wird.

3.1.1. Positive Streamerentladung

Die positive Streamerentladung findet unter Schaltstoßspannung im Bereich der höchsten Spannungsänderungsgeschwindigkeit statt. Ihren Ablauf zeigt Abbildung 3.2 schematisch.

Ein Elektron wird in einem Grundfeld E_0 beschleunigt (a) und bewegt sich auf die Anode zu. Hierbei akkumuliert es kinetische Energie und erfährt elastische Stöße mit angrenzenden neutralen Molekülen. Genügt die mittlere freie Weglänge, um die sogenannte Stoßionisierungsenergie zu überschreiten, kann es zu einem ionisierenden Stoß mit einem neutralen Molekül kommen, wobei ein weiteres Elektron herausgelöst wird. Diese beiden Elektronen werden erneut beschleunigt, und es entsteht eine Elektronenlawine (b), in deren Rücken sehr massereiche und daher sehr träge Ionen zurück bleiben. Sie sind in diesem Vorgang näherungsweise ortsfest. Im gleichen Maße wie die Rate der Ionisierungsvorgänge steigt, steigt auch, einige Größenordnungen kleiner, die Rate der Rekombinationsvorgänge, bei denen Strahlung emittiert wird. Diese Strahlung ist in der Lage, Wegstrecken mit Lichtgeschwindigkeit zu überbrücken und neue Elektronen aus neutralen Molekülen vor der eigentlichen Lawine herauszulösen (c) und somit neue Lawinenprozesse in Gang zu setzen (d). Es kommt zu einem kontinuierlichen Vorwachsen zum Streamerkopf (e). Grundlage hierfür ist eine ausreichende Grenzfeldstärke vor dem Streamerkopf, ansonsten erliegt der Prozess, und es bleiben lediglich die langsamen positiven Ionen zurück. Beim positiven

3. Stand des Wissens zur Entstehung von Fangentladungen

Streamermechanismus wächst die Anode virtuell in Richtung der Kathode und verkürzt somit die Schlagweite. Die elektrisch messbaren Koronaimpulse besitzen dabei Anstiegszeiten von etwa 10 ns bis 20 ns und Rückenhalbwertzeiten von etwa 300 ns. Sie haben Scheitelwerte von bis zu 2 A. Diese Stromhöhen hängen im Wesentlichen davon ab, zu welcher Einsetzfeldstärke ein Startelektron gefunden wurde und wie groß die Leitentladung werden konnte [Gro 1972].

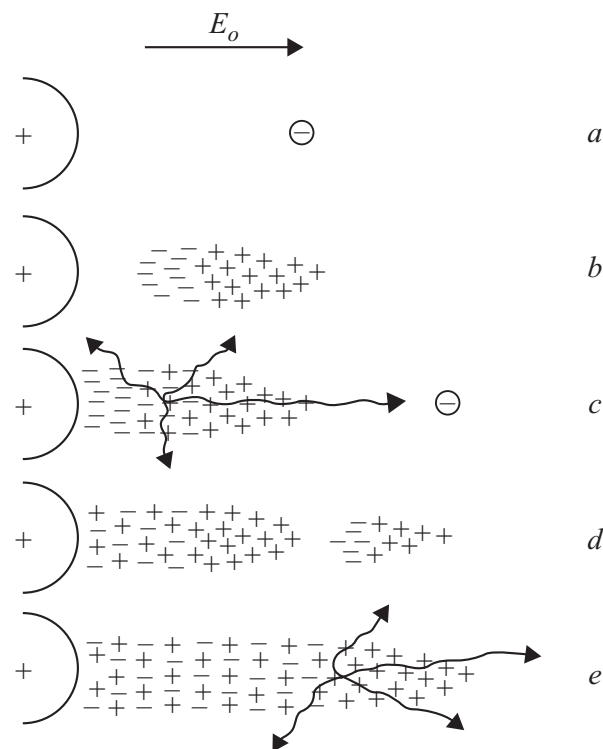


Abbildung 3.2.: Entwicklung der positiven Streamerentladung. a) Elektron im Grundfeld b) Elektronenlawine c) Strahlung in Folge von Rekombination d) sekundäre Streamerentladungen e) weiteres Vorwachsen des positiven Streamers [HW 2004]

Abbildung 3.3 zeigt den Zusammenhang zwischen Einsetzfeldstärke E_i und Stromscheitelwert unter Schaltstoßspannungsbeanspruchung bei unterschiedlichen Stirnzeiten, Elektrodenformen und Schlagweiten.

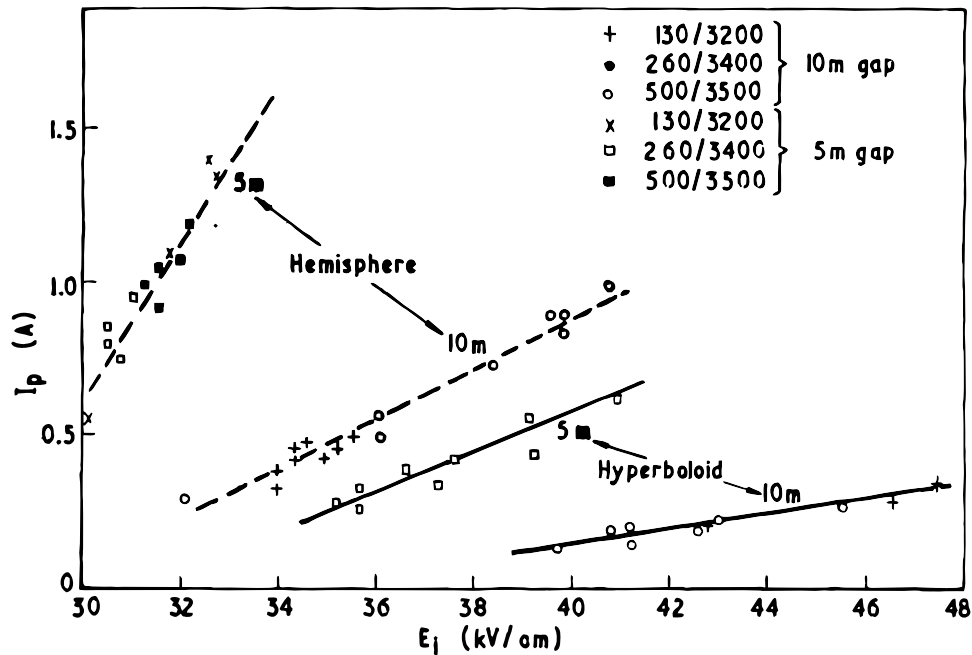


Abbildung 3.3.: Stromeitel I_p von Vorentladungen in Abhängigkeit von der Einsetzfeldstärke E_i unter Schaltstoßspannungsbeanspruchung bei unterschiedlichen Stirnzeiten, Elektrodenformen und Schlagweiten [Gro 1972]

Bei einer homogenen Elektrodenkontur an einer runden Elektrode und nur geringer Schlagweite ergibt sich ein sehr breites und großes kritisches Volumen (Vgl. 3.1.4). Es kann hier zu einer großen Lawine und damit zu einem hohen Stromeitelwert kommen. Bei einer spitzeren Elektrode kommt es zu einer stärkeren Inhomogenität. Das kritische Volumen ist sehr viel kleiner, und die Wahrscheinlichkeit, dass es innerhalb des Volumens zu einer Lawinenbildung kommt, ist vor allem unmittelbar vor der Spitze gegeben. Entsteht eine Lawine, dann ist der Stromeitel also kleiner als bei der runden Elektrode. Dieser Umstand wird später in Abbildung 5.2 in zwei Feldd Bildern an zwei unterschiedlich stark gekrümmten Spitzenelektroden qualitativ dargestellt.

3.1.2. Dunkelzeit

Den Impulsen folgen sogenannte Dunkelzeiten. Während dieser Zeiten kommen die Vorentladungen vollständig zum Erliegen. Abbildung 3.4 zeigt den Zusammenhang

zwischen der Einsetzspannung U_i des ersten Impulses und der anschließenden Dunkelzeit T_d . Stärkere Entladungen treten demnach bei höheren Einsetzspannungen auf. Die größere Anzahl an positiven Ionen führt gleichermaßen zu einer längeren Dauer der Dunkelzeit.

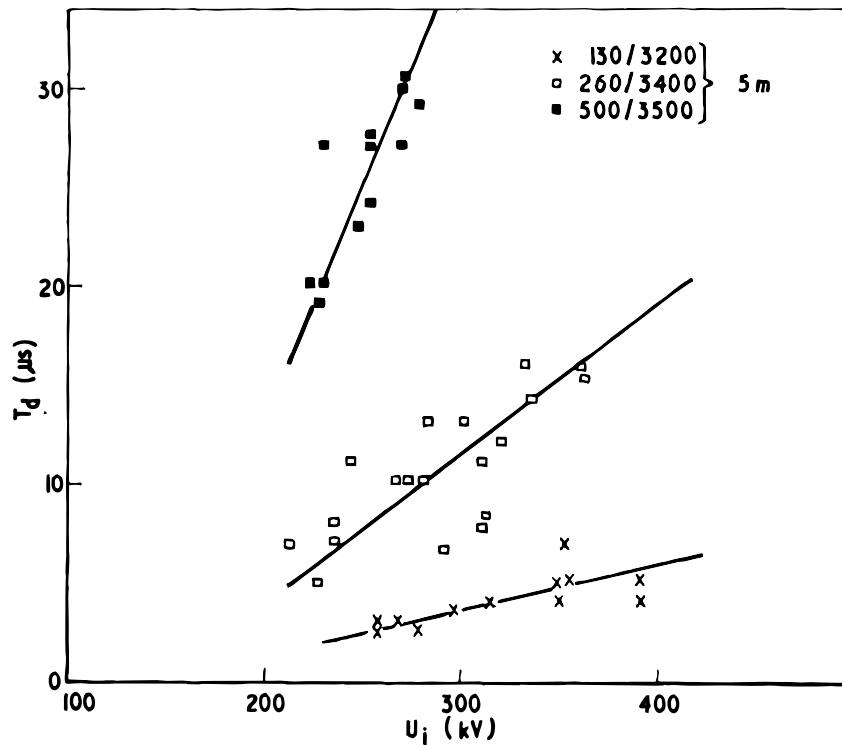


Abbildung 3.4.: Dauer der Dunkelzeit T_d in Abhängigkeit der Einsetzspannung U_i für Spitze-Platte-Anordnung bei einer Schlagweite von 5 m unter Schaltstoßspannungsbeanspruchung bei unterschiedlichen Stirnzeiten [Gro 1972]

3.1.3. Übergang vom Streamer- zum Leitblitzmechanismus

Der Übergang vom Streamer- zum Leitblitzmechanismus wird immer noch intensiv untersucht. Man geht davon aus, dass die Temperatur im Streamerstamm eine kritische Temperatur von 1500 K überschreiten muss, da es hier zur Ablösung von negativen Ionen und so zu einer heißen Thermoionisation kommt. Vernachlässigt man Schwingungsvorgänge im Plasma, dann erfolgt der Übergang, wenn die kritische Ladung von etwa $1 \mu\text{C}$ umgesetzt wird. Diese Größe wird in vielen Leitblitzentstehungsmodellen verwendet [BC 2006a], [Xie 2014].

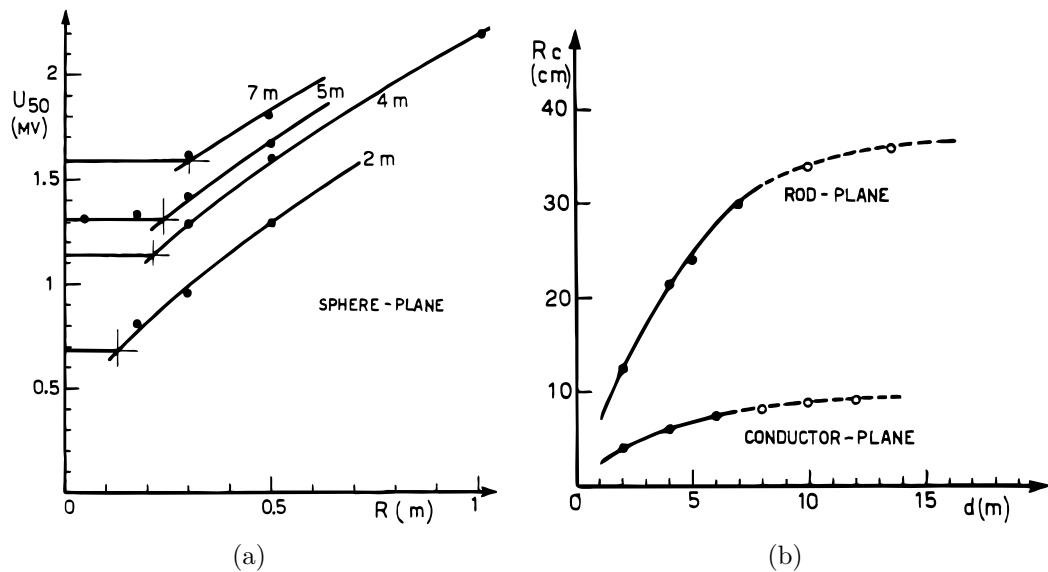


Abbildung 3.5.: Critical Radius Concept a) Durchschlagsspannung bei unterschiedlichen Elektrodenradien und Abständen unter Schaltstoßbelastung und b) Darstellung der kritischen Radien bei zwei unterschiedlichen Anordnungen bei unterschiedlichen Schlagweiten mit angedeuteter Asymptote [CT 1976]

Neuere Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass bei Berücksichtigung der Schwingungsenergie die kritische Ladung kleiner ist und sich in einem Bereich von etwa $0,22 \mu\text{C}$ bewegt [AC 2014a].

Ohne Kenntnis der umgesetzten Ladungen ist bei den Untersuchungen zur positiven Leitblitzentstehung jedoch ein Zusammenhang zwischen der Elektrodenkontur und der Leitblitzentstehung aufgefallen. Bei kleineren Elektrodenradien kommt es zu Vorentladungen, wovon der zeitliche Einsatz der Leitentladung aber unbeeinflusst bleibt. Erst mit steigendem Elektrodenradius gibt es einen Radius, bei dem es nicht mehr zu Vorentladungen kommt und die erste Vorentladung die Leitentladung einleitet. Dieser Radius wird der kritische Radius genannt. Wird der Elektrodenradius weiter vergrößert, so verzögert sich die Entstehung der Leitentladung.

Man stellte weiterhin fest, dass der kritische Radius mit steigender Schlagweite zunahm, sich jedoch asymptotisch einem Endwert nähert. Aus diesem Konzept ist das weit verbreitete „kritische-Radius“ Konzept entstanden. In Abbildung 3.5 wird gezeigt, wie sich die Durchschlagsspannung bei Vergrößerung des Radius der runden Elektrode bei gleichbleibender Schlagweite vergrößert. Man erkennt, dass durch die Vergrößerung der Schlagweite es auch zu einer Vergrößerung des kritischen Radi-

us kommt, bei der die Vorentladung sofort zur Leitblitzbildung führt. In Abbildung 3.5.b sind die Unstetigkeiten für eine Stab-Platte- und eine Leiter-Platte-Anordnung dargestellt.

3.1.4. Kritisches Volumen

Das kritische Volumen wird zum einen durch die Kontur der Durchbruchfeldstärke ($24,4 \text{ kV cm}^{-1}$), ab der es zu einer Ladungsträgervermehrung in Luft kommt, und zum anderen durch die kürzeste Entfernung zur Elektrode begrenzt, bei der es zu einer Ladungsträgerlawine von 10^8 Elektronen kommt.

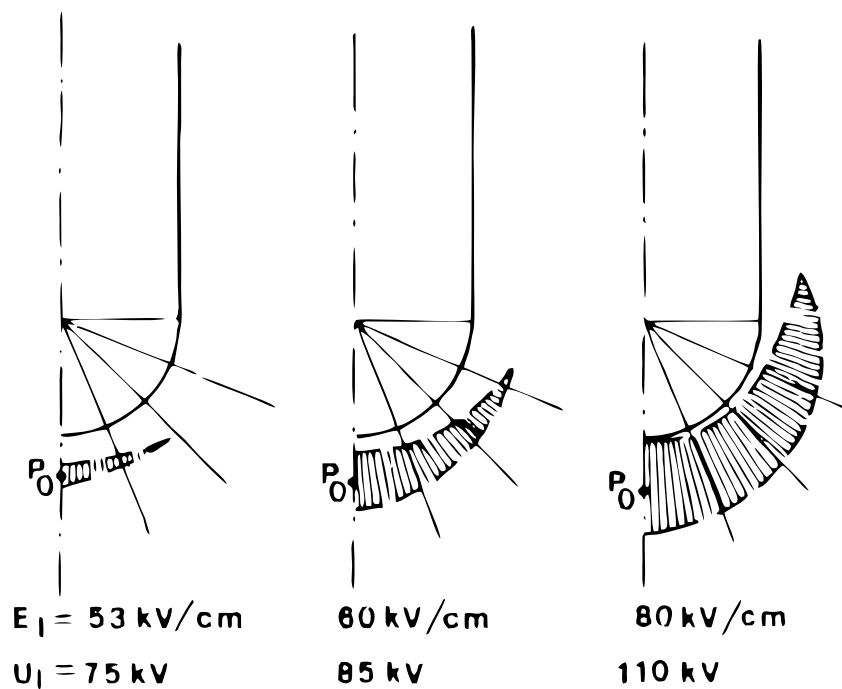


Abbildung 3.6.: Entwicklung des kritischen Volumens (schraffierter Bereich) an einer runden Elektrode bei Steigerung der Spannung U_i und der abgeleiteten Feldstärke E_i im Punkt P_0 [Gal 1979]

Das kritische Volumen beschreibt also dasjenige Volumen, in dem ein Elektron über den Prozess der Ladungsträgervermehrung zu einer Elektronenlawine führt, bei der die Lawine selber einen nicht mehr zu vernachlässigenden feldverzerrenden Effekt besitzt. Hierdurch wird die Ladungsträgervermehrung vor und hinter der Lawine durch

Strahlung begünstigt, weshalb es also einen Teildurchschlag nach dem Streamer-Mechanismus gibt. Hierbei kommt es noch nicht zu einer heißen Thermoionisation oder gar zu einem Leitblitzstamm. Ist die Lawine jedoch groß genug und setzt eine kritische Ladung um, dann kommt es zur Thermoionisation und zur Bildung eines Leitblitzstammes. Ohne ein kritisches Volumen kann es also zu keiner Voroder Hauptentladung kommen. Abbildung 3.6 zeigt das kritische Volumen unter Laborbedingungen bei einer ansteigenden Spannung an einer runden Elektrode. Mit zunehmender Spannungssteigerung wird das Volumen zum einen größer, weshalb die Wahrscheinlichkeit für einen Streamerprozess steigt, und zum anderen können Lawinen, die sehr nahe an der Ionisationsgrenze liegen, recht große Lawinen erzeugen, weshalb die Entladungen dann ladungsreicher werden und hiermit die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung eines Leitblitzkanals steigt.

3.2. Unkonventionelle Blitzschutzkonzepte

3.2.1. Allgemeines

Im Bereich der unkonventionellen äußeren Blitzschutzeinrichtungen wird zwischen zwei Systemen unterschieden - zum einen dem Early Streamer Emission (ESE)-Device und zum anderen dem Dissipation Array System (DAS). Beim ESE-Device fußt die Überlegung darauf, dass Fangentladungen früher erzeugt werden als bei gewöhnlichen Franklinfangstangen. Auf diese Weise sollen größere Schutzräume möglich sein. Beim DAS sollen gezielt Raumladungen erzeugt werden, um eine Fangentladung zu verzögern und den Blitzeinschlag zu verhindern. Da die genormten Schutzverfahren, wie die Schutzwinkelmethode, die Maschenmethode und die Blitzkugelmethode keinen Spielraum zulassen, um die Einfangwirksamkeit von Fangstangen in irgendeiner Form zu beeinflussen, wird in diesem Zusammenhang häufig mit der Collection Volume Method (CVM) gearbeitet. Aus diesem Grund soll zuerst das Konzept der CVM vorgestellt und im Anschluss die beiden unkonventionellen Schutzsysteme vorgestellt werden.

3.2.2. Collection Volume Method

Diese Methode wurde von Eriksson entworfen und sollte versuchen, die Schwächen des elektro-geometrischen Modells zu beseitigen. Die Methode findet schon seit etwa zwanzig Jahren Anwendung und wird zumeist bei der Platzierung von ESE-Devices genutzt. Im Wesentlichen unterscheidet sie sich erst einmal nicht von dem elektro-geometrischen Modell. Sie weist jedoch jeder Fangeinrichtung einen Anziehungsradius zu, welcher sich aus geometrischen und geografischen Überlegungen ableitet, und manipuliert somit die Enddurchschlagstrecken. Möglich wird dies über Faktoren, bei denen bestimmten Punkten eines Gebäudes die Möglichkeit eingeräumt wird, längere Fangentladungen zu erzeugen, als dies andere Punkte können. Auf diese Weise möchte man ein realistischeres Modell schaffen [DG 2001], [DG 2000a].

Die Methode soll dabei folgende Punkte berücksichtigen:

- Wesentliche Blitzparameter, wie Ladung, Ladungsverteilung, Leitblitzwachstum und Stromhäufigkeitsverteilungen
- Höheneffekte, welche den Durchschlagsprozess in Luft beeinflussen
- Feldstärkeintensivierungen infolge von Spitzenwirkungen
- Variation einiger blitzphysikalischer Parameter, die den Blitzfang beeinflussen (beispielsweise die Geschwindigkeit der Fangentladung)

In der Methode werden alle Kanten des zu untersuchenden Gebäudes im Sinne des „kritischen-Radius“-Konzeptes abgerundet, damit es zu einer Leitblitzentladung kommt, sobald die Durchbruchfeldstärke am Gebäude überschritten ist. Die Durchbruchfeldstärke unterliegt Einflüssen wie Temperatur, Luftdruck oder Luftfeuchte. Eine Feldberechnung soll dann die Intensivierungsfaktoren K_i des zu untersuchenden Gebäudes ermitteln. Sie werden maßgeblich durch die Höhe des jeweiligen Punktes beeinflusst.

Die Punkte mit den höchsten K_i -Faktoren sind die potentiellen Startpunkte für Fangentladungen. Für jeden dieser Punkte wird in Abhängigkeit von dem Intensivierungsfaktor und des erwarteten Stromscheitelwerts des Hauptblitzes eine Anziehungsdistanz definiert. Im besten Fall sind diese Punkte durch Fangeinrichtungen besetzt. Die sich für die verschiedenen Geschwindigkeitsverhältnisse ergebenden Schutzräume sind in Abbildung 3.7 dargestellt. Dabei beschreibt K_v das Verhältnis

der Geschwindigkeiten von Abwärtsblitz und Fangentladung. Schnelle Fangentladungen führen somit zu größeren Schutzräumen.

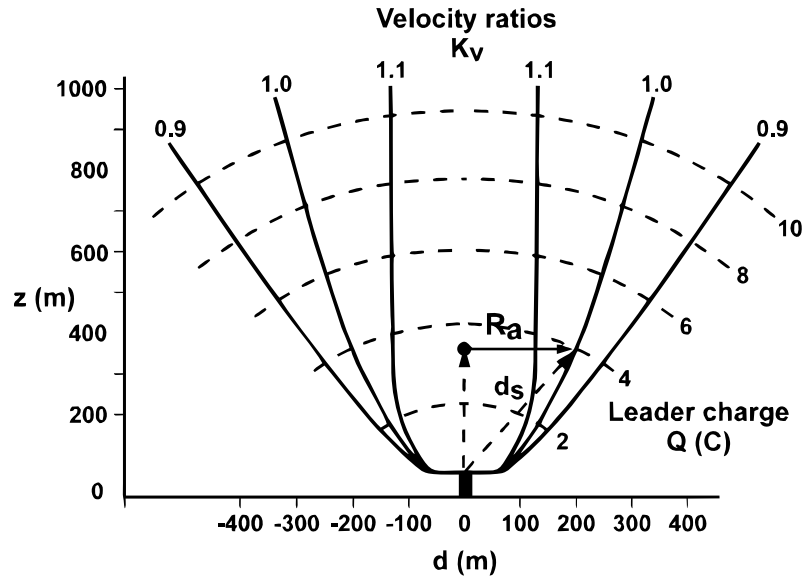


Abbildung 3.7.: Unterschiedliche Schutzräume, abhängig von Ladung und Geschwindigkeitsverhältnis von Abwärts- und Aufwärtsleitblitz [DG 2001]

Diese Methode wird von ESE-Befürwortern gerne eingesetzt, da sich danach sehr große Gebäude mit nur einer einzigen Fangeinrichtung schützen lassen. Die Methode wird jedoch von der Fachwelt stark kritisiert und abgelehnt [Mou 2012]. Zum einen nimmt der Schutzraum mit der Höhe des Aufstellungsorts der Fangeinrichtung zu. Blitzeinschläge unterhalb des höchsten Punktes sind durch dieses System nahezu ausgeschlossen, können aber in der Realität immer wieder beobachtet werden. Zum anderen sollen langjährige Blitzeinschlagbeobachtungen belegen, dass die nach dieser Methode geplanten Schutzsysteme die berechneten Schutzwirkungen erzielen und somit die Realität besser und normgerechter abbilden als die bekannten Modelle [PD 2002], [HW 2016]. Im Gegenzug werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen angezweifelt und auf Fehlfunktionen von Blitzzählern hingewiesen [HR 2008]. Es gibt Bemühungen, die Methode durch die amerikanische Normung zu sanktionieren. Bisher ist dies jedoch noch nicht geschehen.

3.2.3. Early Streamer Emission-Prinzip

Ein ESE-Device kann leicht von einer konventionellen Fangeinrichtung durch das Vorhandensein eines kleinen Objekts in der Nähe der eigentlichen Fangspitze unterschieden werden. Dieses kleine Objekt beinhaltet üblicherweise die Entladeeinrichtung. Das geometrische Aussehen kann dabei sehr komplex anmuten. Die folgenden unterschiedlichen Typen von ESE-Devices werden unterschieden:

- Fangstangen mit radioaktiven Quellen,
- Fangstangen, welche mit einer passiven elektrischen Triggereinrichtung ausgestattet sind,
- Fangstangen, welche mit einer aktiven elektrischen Triggereinrichtung ausgestattet sind.

Anzumerken ist, dass es keine Fangstangen mehr gibt, die mit radioaktiven Elementen arbeiten.

3.2.3.1. Allgemeines Konzept

Der ESE-Device stellt direkt an der Fangstangenspitze Ladungsträger zur Verfügung, um eine Fangentladung zu starten. Unter Laborbedingungen konnte hier ein positiver Effekt beobachtet werden [Ber 1994], [All 1998].

Im Mittel war ein zeitlicher Vorteil Δt_{ESE} zugunsten des ESE-Devices im Labor nachweisbar. Der Zeitvorteil beträgt dabei einige Mikrosekunden und wird von den Herstellern der ESE-Devices in einen Distanzzuwachs Δl_{ESE} umgerechnet. Der hierbei genutzte Proportionalitätsfaktor ist die Geschwindigkeit, mit der sich die beiden Leitblitzköpfe aufeinander zubewegen. Hierbei orientiert man sich an Laborwerten. Die französische Norm NF C 17-102 gehört international zu den wenigen Normen, in der ESE-Devices erwähnt werden. Hier wird die relative Geschwindigkeit beider Leitblitze mit $v_{\text{ESE}} = 1 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$ festgelegt, woraus sich aus einem üblichen Zeitvorteil¹ von $60 \mu\text{s}$ ein Distanzvorteil Δl_{ESE} von 60 m berechnen lässt. Gleichung 3.1

¹ In der franz. Norm ([NFC 17-102]) Δt_{ESE} ist der Wert $60 \mu\text{s}$ als maximaler erreichbarer Zeitvorteil definiert.

zeigt, wie sich der Distanzzuwachs des Schutzraumes berechnet [NFC 17-102].

$$\Delta l_{\text{ESE}} = v_{\text{ESE}} \cdot \Delta t_{\text{ESE}} \quad (3.1)$$

3.2.3.2. Ausführungsformen

Die wohl umstrittensten Systeme sind die radioaktiven ESE-Devices. Die hier verwendeten Materialien, wie zum Beispiel ^{241}Am (Halbwertszeit 433 Jahre), emittieren schwache α -Partikel. Sie können die Luft in einer Distanz von bis zu 3 cm um die Spitze ionisieren. Bei Laboruntersuchungen ließ sich ein Vorteil gegenüber gewöhnlichen Fangstangen nachweisen [Hea 1993]. Es wurden dennoch viele Fragen, vor allem über das Gefährdungspotential für den Menschen, aufgeworfen. Aus diesem Grund wurde diese Form der ESE-Devices in den meisten Ländern verboten.

In der Folge sind vermehrt elektrisch getriggerte ESE-Devices eingeführt worden. Das hier verwendete Prinzip ist im wesentlichen dasselbe wie bei den radioaktiven Systemen. Sie besitzen den potentiellen Vorteil einer besseren Kontrolle der Entladung [VNS 2000].

Als prominentester Vertreter für ein passives ESE-Device ist die „Dynasphere“-Fangstange zu nennen. Sie wurde ursprünglich von Richard Gumley (Global Lightning Technology (GLT)) entwickelt und wird nun von der Firma Erico vertrieben. Sie besitzt einen relativ einfachen Aufbau, welcher in Abbildung 3.8 dargestellt ist. In ihrem Kern befindet sich eine normale Franklinfangstange (21). Um die Spitze herum jedoch ist eine zusätzliche, halbrunde Elektrode (24) angebracht, welche sich auf einem freien Potential befindet und mit einer definierten Kapazität (43) mit der Fangstange verbunden ist. Die Idee ist, dass durch die Anhebung der Feldstärke infolge eines herannahenden Vorläuferblitzes es zu einem kapazitiven Spannungsteiler zwischen der freien Kapazität und dem Leitblitzkopf kommt. Das Potential auf der metallischen Halbkugel verändert sich, und es kommt zu einer Spannung zwischen der Elektrode und der geerdeten Fangstange. Über einen kleinen Widerstand (42) wird eine Zeitkonstante eingestellt, um eine dauerhafte Aufladung während Gewitterstürmen zu vermeiden. In einem kleinen Spalt (32) am oberen Ende der Fangstange, zwischen dem Potential der Halbkugel und der geerdeten Fangstange, sollen sich nun hohe Feldstärken ergeben. Sobald die Feldstärke in dem kleinen Spalt die Durchbruchfeldstärke von Luft überschreitet, kommt es hier zu kleinen

3. Stand des Wissens zur Entstehung von Fangentladungen

Entladungen. Diese werden zusätzlich über einen Isolator (38) gezwungen. Auf diese Art und Weise sollen die Ladungsträger genau vor der geerdeten Fangstange bereit gestellt werden.

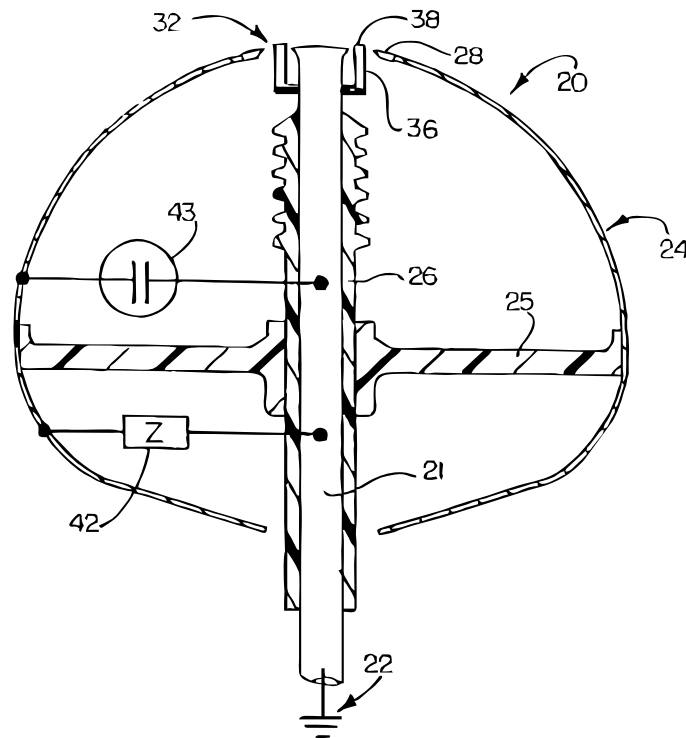


Abbildung 3.8.: Schnittbild aus dem Patent zur Dynasphäre mit (21) leitende Stange, (22) Erdpotential, (24) leitende Hülle, (25) isolierender Stützer, (26) isolierendes Material, (32) Luftspalt, (38) Isolator, (42) einstellbare Impedanz und (43) einstellbare Kapazität [Gum 2001]

Der Aufbau von aktiven ESE-Devices ist meist komplizierter, die Idee jedoch ist analog zu der der passiven ESE-Devices. Eine Ladeeinrichtung, welche über eine Energiequelle nachgeladen wird, lädt dauerhaft eine Hochspannungseinrichtung. Dort werden impulsförmige Entladungen erzeugt, welche zur sonst isolierten Spitze emittiert werden. Bei einer erfolgreichen Fangentladung soll dann der Stromfluss über die äußere Elektrode hergestellt werden. Die Triggerung der Fangstange erfolgt über Sensoren, wie zum Beispiel Feldsonden oder Fotodioden.

3.2.3.3. Wirksamkeitsbetrachtungen

Es gibt drei mögliche Ansätze, um die Wirksamkeit von ESE-Devices zu untersuchen. Dazu gehören Studien in Laborumgebungen, Simulationen an theoretischen Modellen und Freiversuche mit natürlichen oder künstlichen Blitzen. Zu jedem dieser Ansätze gibt es Beanstandungen, welche die jeweilige Untersuchung hinsichtlich ihrer Aussagekraft angreifen.

3.2.3.3.1. Laboruntersuchungen Hier werden Versuche mit „großen“ Schlagweiten von 2 m bis 15 m durchgeführt. Unter Schaltstoßspannungsbelastung konnten sich in einigen Versuchen die gewünschten Effekte erzielen lassen [All 1998]. Es zeigte sich jedoch auch, dass der zu frühe Einsatz von Vorentladungen kontraproduktiv sein kann. Laborentladungen unterscheiden sich zudem von den natürlichen Entladungen, was die Vorwachsengeschwindigkeiten und die Stromhöhen angeht [VNS 2000]. Im Labor erzeugte Leitblitze haben das Problem, dass sie nicht lang genug sind, um sich vollständig zu thermoionisieren. Sie benötigen daher auch sehr viel größere Hintergrundfeldstärken, um sich zu entwickeln, als dies in der Natur nötig und der Fall ist [Coo 2009].

Aus diesem Grund gibt es auch Untersuchungen, die den ESE-Devices gar keinen Vorteil einräumen [CH 2003] oder nur einen äußerst geringen Längenvorteil einräumen (bspw. 1,4 m [AF 1998]), wenn nicht höhere Ausbreitungsgeschwindigkeiten für Abwärtsblitz und Fangentladung angenommen werden.

Offensichtlich können reale Blitzentladungen und Fangentladungen nur schlecht im Labor simuliert werden, da die Schlagweiten um mindestens eine Größenordnung zu klein sind. Weiterhin kann im Labor nur schwer der natürliche Feldstärkeverlauf nachempfunden werden. Bei der natürlichen Feldstärkebeanspruchung wird die Feldstärkeänderung in ihrem zeitlichen Verlauf immer steiler, wohingegen sie in Labors immer flacher wird, da hier nur Doppelexponentialstöße erzeugt werden können [BC 2007]. Um realistische Feldverläufe zu erzeugen, bräuchte man auf Halbleitern basierende Stoßspannungsgeneratoren. Diese können entweder nicht genug Ladung bereit stellen oder nur zu kleine Spannungsscheitelwerte erzeugen. Die Untersuchung von Fangentladungen gelingt somit im Labor nur sehr unzureichend [Plö 2012], [AW 2009], [Gum 1999].

3.2.3.3.2. Theoretische Untersuchungen Durch die Weiterentwicklung der Computertechnik ist es möglich geworden, immer komplexere Vorgänge zu analysieren. So können Feldstärken komplexer Anordnungen durch FEM-Modelle sehr schnell angenähert werden, ohne selber analytische Gleichungen lösen zu müssen. Durch Laboruntersuchungen mit Funkenstrecken wurden verschiedene Modelle entwickelt, welche die Streamerentstehung, die Leitblitzentstehung und das Vorwachsen des Leitblitzes beschreiben. Die Modelle extrapolieren hier die im Labor gefundenen Verhaltensweisen auf die natürlichen Bedingungen [Bec 2008].

Mit dem ambitioniertesten Modell SLIM wurde versucht nachzuvollziehen, ob der Entstehungsprozess einer Fangentladung im Labor mit dem in der Natur gleichzusetzen ist. Die Simulation ergab, dass es hier keinen Zeit- und vor allem keinen Längenvorteil bei der Fangentladung gibt. Als Grund wird der stark unterschiedliche Verlauf der Feldstärkeänderung an der Fangstange angeführt [BC 2008].

3.2.3.3.3. Untersuchungen mit natürlichen und raketengezündeten Blitzen

Der scheinbar einfachste und am wenigsten kontroverse Weg, Blitzschutzfangeinrichtungen zu testen, ist offenkundig, sie unter natürlichen Bedingungen zu testen. Aufgrund der Seltenheit von Blitzen und den nie gleichen Randbedingungen ergeben sich hier natürlich Validierungsschwierigkeiten.

Natürliche Bedingungen bei einem Blitzeinschlag können auch nur bedingt durch künstlich initiierte Blitze nachempfunden werden, da man hier nur Aufwärts- und Folgeblitze untersuchen kann [S 2005].

Eine der interessantesten Studien wird auf dem Baldy Peak durchgeführt. Hier sollten in einer Studie ursprünglich nur stumpfe und spitze Fangstangen unter natürlichen Bedingungen in einen Wettstreit treten. Zusätzlich wurden ESE-Devices installiert. Dabei wurden die Ströme der Streamerentladungen aufgezeichnet, und die Feldstärken vor den Spitzen untersucht. Interessanterweise wurde in dieser Zeit keine einzige spitze Fangstange getroffen. Nur Fangstangen mit Spitzenradien von 12,7 mm bis 19 mm konnten Blitzeinschläge registrieren. Es wurde darüber hinaus während der gesamten Untersuchungsdauer kein einziges ESE-Device getroffen. Auch hier werden Raumladungen, welche sich vor der Spitze bilden, für die Ergebnisse verantwortlich gemacht [MAR 2001].

Die hier gewonnen Erkenntnisse werden oft von den ESE-Gegnern als Beweis für das Versagen der Technologie angeführt. Ein Kritikpunkt an dieser Untersuchung

ist jedoch die Tatsache, dass die untersuchten Fangstangen sehr nah (Abstand ca. 3 m) zusammen stehen. Man geht mittlerweile davon aus, dass die stromstärkste Fangentladung ihre konkurrierenden Fangentladungen schwächt und unterdrückt [Coo 2010b]. Die Vermutung liegt nahe, dass wenn die abgerundete Fangstange nicht vorhanden gewesen wäre, eine der anderen beiden Fangstangen mit der gleichen Enddurchschlagstrecke getroffen worden wäre.

Hartono dokumentiert und veröffentlicht viele Einzelfälle, in denen ESE-Devices offenkundig Blitze nicht einfangen konnten [HR 2003], [HR 2011]. Die Fälle dokumentieren Einschläge, bei denen ESE-Devices nach der CVM platziert wurden. Die Gebäude wurden dabei immer in Zonen getroffen, die ursprünglich zum Schutzraum des jeweiligen ESE-Device gehören sollten. Eine Vielzahl dokumentierter Fälle sind aus der Region um Kuala Lumpur bekannt [HR 2003].

3.2.4. Dissipation Array System

Der primäre Anspruch an ein DAS ist, dass eine Struktur, welche durch dieses System geschützt ist, nicht von einem Blitz getroffen werden kann, sei es, weil das Auftreten von Blitzen in diesem Bereich unterbunden wird oder aber weil keine Einschlagmöglichkeiten am geschützten Gebäude entstehen können.

Auf diese Weise würden alle indirekten Blitzstromfolgen vermieden werden, was der nächste Schritt in der Evolution der Blitzschutzsysteme sei. Als Begründung dienen die immer größere Verbreitung von hochempfindlicher Elektronik [CD 1998] und die Verminderung von Kosten, nicht nur im Falle eines Schadens, sondern auch durch die Planung und Installation [CA 1995].

Der bekannteste Begriff für dieses Blitzschutzsystem ist DAS und ist ein geschützter Produktname der Firma Lightning Eliminators & Consultants (LEC). Weitere Synonyme sind CTS, SBI, Spline Ball Terminal (SBT), Streamer Delaying Air Terminal (SDAT) und Ion Plasma Generator (IPG) [Dra 1999a].

3.2.4.1. Allgemeines Konzept

Die ursprüngliche Intention war die, Ionen zu erzeugen, um die negative Ladung der Gewitterwolke zu entladen und so das Entstehen von Blitzen zu unterbinden [Zip 2000] [UR 2002]. Abgeleitet hat man dieses Verhalten aus dem Labor, wo

Gleichspannungsquellen (Van de Graaff Generator) durch Koronaentladungen entladen werden konnten [Zip 2000]. Dieser Ansatz krankt jedoch an zwei wesentlichen Faktoren:

- Die Koronaströme, auch von natürlichen Spitzen (Bäumen, Büschen, Gras, ...), reichen nicht aus, eine nennenswerte Ausgleichsladung zu generieren, um die Gewitterwolkenladung zu neutralisieren [Mou 2003].
- Die Feldstärken in Bodennähe betragen üblicherweise kaum mehr als 10 kV m^{-1} . An hohen Objekten (größer 100 m) sind Feldstärken mit bis zu 100 kV m^{-1} möglich. Die Beweglichkeit von Ionen befindet sich in einem Bereich von etwa $3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, und somit wären die Ionen in zehn Sekunden (der ungefähren Zeit zwischen zwei Blitzen) etwa in der Lage, 150 m an Höhe zu erreichen [UR 2002].

Nachdem die erste Funktion unhaltbar war und mittlerweile auch nicht mehr in der Literatur auftaucht, sollte das DAS zumindest den Einschlag in einem bestimmten Bereich unterbinden können. Hierfür sind für ein DAS drei Zustände definiert [CA 1995]:

- Passiver Zustand bei kleiner 10 kV m^{-1}
- Korona- und Einzelentladungen bei größer 10 kV m^{-1}
- Entstehung von Streamerentladungen

Abbildung 3.9 zeigt die schematische Darstellung eines SBI. Hier sind 30 cm lange Spitzen mit Öffnungswinkeln von 5° zu einer runden Kugel geformt.

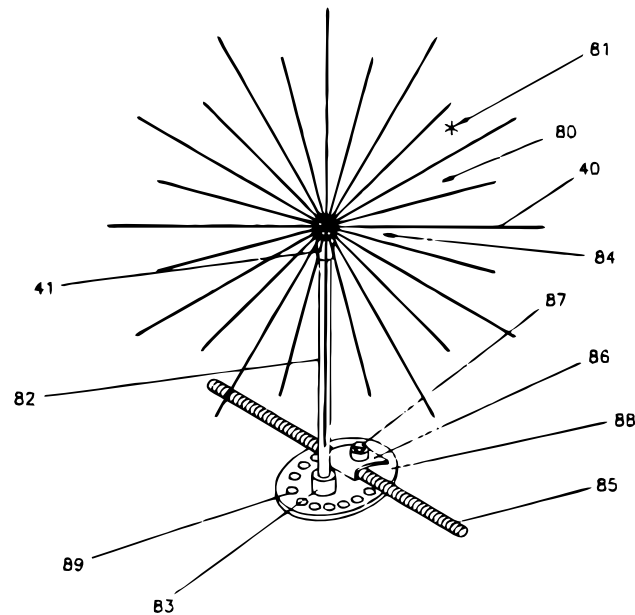


Abbildung 3.9.: Dreidimensionale Darstellung eines Spline Ball Ionizer (SBI) aus dem Patent [Car 1991]

Hier sollen Koronaentladungen für positive Raumladungen sorgen, welche die bodennahe Feldstärke absenken. Ziel ist es, die Entstehung einer Streamerentladung zu unterbinden, welche zu einer heißen Plasmaentladung und so zu einem Leitblitzstamm wird [BD 2003]. Man versucht also, die Entstehung einer Fangentladung zu unterdrücken. In Bodennähe regulieren sich die Koronaströme weitestgehend selbst, da die positiven Raumladungen eine Feldschwächung und somit eine Schwächung der Raumladungsschicht in Bodennähe nach sich ziehen. An hohen Strukturen, an denen ein permanenter Abtransport der erzeugten Ladungsträger entsteht, ist es fraglich, ob sich unterschiedliche Bedingungen durch ein DAS erzeugen lassen.

Es wird also die Behauptung angestellt, dass die Ladung des Leitblitzes selber einen nicht stationären Strom erzeugt, welcher die schützende Raumladung speist [Noa 1999].

3.2.4.2. Wirksamkeitsbetrachtungen

Um die Wirkungsweise zu belegen, werden immer wieder die zufriedenen Kunden genannt. Etwa 33.000 DAS-Systeme wurden in 31 Jahren bis 2003 bereits verkauft

[Car 2003]. Es habe vor allem zu Beginn einige Fehler gegeben, die man nun jedoch im Griff habe, und hätte somit eine 99 % Wahrscheinlichkeit, Blitze zu verhindern [CA 1995]. Beliebte Beispiele für die Fehlfunktion dieser Technologie, wie der Blitzeinschlag am Tower vom Flughafen in Tampa (Florida), seien eine Täuschung oder Fehlinterpretation gewesen, und es gebe nachweislich keinen Einschlag am dort installierten DAS [CA 1995], [Zip 2000].

Zur weiteren wissenschaftlichen Untermauerung werden Laborexperimente durchgeführt, welche die Koronaströme bei verschiedenen Konfigurationen und Systemen vergleichen. Interessant ist hierbei die Tatsache, dass man sich immer an Franklin-Fangstangen misst, die für sich ja nie die Eigenschaft besitzen sollen, Einschläge an ihrem Installationspunkt zu verhindern. Dennoch werden in [Grz 2005], [DG 2000b], [Grz 2007], [Gal 2000], [Dra 1999b], [GMD 2009] und [Dju 2012] verschiedene Laborversuche durchgeführt, bei denen DAS mit Franklinfangstangen verglichen werden. Demgegenüber stehen wenige Einzeluntersuchungen, bei denen beispielsweise zwei Türme mit DAS ausgestattet wurden [Kuw 1998], um die Zahl der jährlichen Einschläge zu reduzieren. Im Zeitraum 1991 bis 1994, bevor die Türme ausgerüstet wurden, kam es zu 26 Einschlägen und nach der Installation kam es in den folgenden zwei Jahren zu weiteren 16 Einschlägen. In [GT 1996] wird der Critical Flashover (CFO) an Freileitungen mit zwei DAS untersucht. Man kommt zu dem Schluss, dass diese die Einschläge nicht eliminieren, sondern im Gegenteil sogar einsammeln. Eine der wesentlichen Annahmen kann jedoch durch Experimente nicht belegt werden. Die erzeugten Koronaströme nehmen nicht mit der Anzahl von Spitzen linear zu [Mou 2003], [UR 2002], [Ris 2003], [Dra 1999b].

4. Ziele der Arbeit

Die Technologie der aktiven Blitzfangstangen hat in der Vergangenheit eine Vielzahl von Fragen und Problemen aufgeworfen. Im Bereich der Wissenschaft werden immer wieder die Vor- und Nachteile dieser neuen Technologie gegeneinander abgewogen sowie die Frage nach der technischen Realisierbarkeit der proklamierten Sicherheitszone untersucht. Problematisch ist hierbei, dass es kein eindeutiges Wissen über die Wirkungszusammenhänge bei der Bildung einer erfolgreichen Fangentladung gibt, da Blitze ein sehr seltenes Ereignis und die Kenngrößen äußerst aufwendig zu messen sind. Die sich hieraus ergebende Unsicherheit erklärt, weshalb die Technologie der unkonventionellen Blitzschutzsysteme, auch nach Jahren der Verbreitung, noch in kaum einer Norm sanktioniert ist. Die Schlussfolgerung kann daher nicht lauten, dass unkonventionelle Blitzschutzsysteme untauglich sind, sondern dass sie möglicherweise untauglich sind. Es gibt keine eindeutigen Kriterien, die eine Grundlage bieten, um zu bewerten ob diese unkonventionelle Blitzschutzsysteme zur Erfüllung ihres Zweckes ungeeignet sind. Hieraus folgt eine normative Unsicherheit [Bog 2013]. Üblicherweise wird versucht, die Unsicherheit mit Hilfe der Forschung in Bestimmtheit zu überführen, um eine Eindeutigkeit in der Sachlage zu erhalten. Hierbei ergeben sich jedoch vier konkrete Probleme:

1. Eine kognitive Unsicherheit in Bezug auf die Wirksamkeit von unkonventionellen Blitzschutzsystemen liegt vor, und es ist nicht eindeutig zu klären, inwiefern die proklamierten Sicherheitszonen unter natürlichen Bedingungen realisierbar sind. Damit ist nicht klar, ob unkonventionellen Blitzschutzsysteme geeignet sind, den Zweck „Sicherheit“ zu erfüllen.
2. Eine normative Unsicherheit liegt vor, da es keine Bewertungsgrundlage gibt, auf deren Grundlage Fangstangen hinsichtlich ihrer Eigenschaft bewertet werden, wie gut sie Blitze einfangen.

3. Es kommt in der Folge zu einem schwer einzuschätzenden Risiko beim Einsatz von aktiven Fangstangen.
4. Es gibt keine Instanz, welche die Verantwortung hinsichtlich des Einsatzes dieser neuen Technologie übernimmt.

In der Diskussion finden sich verschiedene Akteure mit unterschiedlichen Interessen und Risikowahrnehmungen. Sie geben verschiedenen Werten den Vorzug, und es kommt in der Diskussion um neuartige Blitzfangstangen zu Wertekonflikten. Dabei kollidieren Sicherheit und Wirtschaftlichkeit, individuelle Konsumfreiheit und institutionelle Verantwortung, wissenschaftliche Exaktheit und Pragmatik sowie altbewährte und neue Technologie. Da es keine neue „Situationsspezifik“ oder keinen „Krisendruck“ gibt, sollte man sich an Altbewährtem orientieren. Hierdurch fällt die „Rechtfertigungslast“ dem Neuen, also den neuartigen Blitzschutzkonzepten zu [Ngu 2015].

Die Technologie ist jedoch weit verbreitet, ohne dass die Hersteller die Fachwelt davon überzeugt haben. Die Beweislast liegt umgekehrt, und so bemühen sich Wissenschaftler seit einigen Jahrzehnten darum, belastbares Wissen zu erzeugen, um Eindeutigkeit in der Frage zu erlangen, ob aktive Fangstangen das richtige Mittel sind, um den Zweck Blitzschutz zu erfüllen oder diesen sogar verbessern können [CT 2007]. Das Ziel dieser Arbeit ist es daher, einen Beitrag zu liefern, der es möglich macht, dem Verständnis der Entstehung von Fangentladungen unter Einfluss eines negativen Leitblitzes ein Stück näher zukommen. Diese Untersuchungen sind nötig, um die existierenden physikalischen Modellvorstellungen, die bisher nur in die Natur extrapoliert wurden, zu überprüfen. Nur auf dieser Grundlage wird die Möglichkeit gegeben, neuartige Fangeinrichtungen im Hinblick auf ihre Einfangeffektivität und Wirkungsweise bewerten zu können. Die bislang fehlende Eindeutigkeit in der Sachlage muss durch neue wissenschaftliche Ergebnisse herbeigeführt werden. Nur so lässt sich der Einsatz dieser Technologie verhindern oder legitimieren. In beiden Fällen geht es dabei nicht nur um den Schutz von teilweise extrem hohen Sachwerten, sondern insbesondere auch um den des menschlichen Lebens.

Um fundierte Aussagen treffen zu können, muss die Entstehung unbeeinflusster Fangentladungen in der Natur beobachtet werden. Da Blitzparameter stark streuen, muss eine Vielzahl von Messungen durchgeführt werden. Die interessierende Blitzart ist der negative Abwärtsblitz, welcher an den etablierten Messeinrichtungen nur in geringer Zahl messbar ist. Bei der geringen Blitzdichte in Deutschland ist die

Lösung daher, eine Vielzahl von leistungsfähigen Messeinrichtungen an möglichst aussichtsreichen Messorten zu installieren.

Um dieses hochgesteckte Ziel erreichen zu können, müssen die folgenden Arbeitspakete bearbeitet werden:

- Es muss ein kostengünstiges und leistungsfähiges Messgerät entwickelt und gebaut werden.
- Laboruntersuchungen sollen die Funktionsweise bei hohen Störfeldern und widrigen Umweltbedingungen belegen.
- Um die Effektivität der Installationen zu steigern, muss eine sorgsame Standortwahl getroffen werden.
- Das Ziel sollte es sein, bis zu 60 Messeinrichtungen zu bauen und zu installieren.

5. Entwicklung des Kritischen Volumens im Labor und der Natur

Das kritische Volumen (siehe 3.1.4) ist ein wesentlicher Parameter, der die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung von Vorentladungen und deren Größe beschreibt. In diesem Kapitel soll der Einfluss auf die Entstehung einer Fangentladung, also eines positiven Leitblitzes im Labor und in der Natur, qualitativ gezeigt werden. Dies ist besonders vor dem Hintergrund interessant, dass das Einbringen künstlicher Vorentladungen an einer Fangstange einen sehr viel kleineren Effekt haben könnte, als dies Laborexperimente suggerieren. Eine solche Betrachtung wurde so noch nicht angestellt, stellt aber gleichzeitig den wesentlichsten Grund dar, weshalb die Fangentladungsentstehung in der Natur und nicht im Labor untersucht werden muss. Lediglich die wesentlich komplexere Betrachtungsweise mit dem Self Consistent Leader Inception Modell (SLIM) fußt auf dem gleichen Sachverhalt und kommt im Wesentlichen zum selben Ergebnis.

5.1. Simulationsansatz

Für die Simulation der elektrischen Feldstärken an der Spitze einer Fangstange wird COMSOL Multiphysics® eingesetzt. Es wird eine quasistationäre Feldberechnung mit dem Modul „electro statics“ durchgeführt. Die Simulation wird rotationssymmetrisch an einer Spitze-Platte-Anordnung durchgeführt. Die Hochspannungselektrode wird mit einem Durchmesser von 90 cm simuliert. Die Schlagweite beträgt 2 m. Alle Ränder und die Elektroden sind perfekt leitfähig. Das elektrische Feld wird qualitativ berechnet. Da die Feldstärke proportional zur angelegten Spannung ist, stehen nun die Feldbilder für verschiedene Spitzenradien und Feldstärken zur Verfügung.

Die Anordnung ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

Mit den Feldbildern bei unterschiedlichen Spannungshöhen können die Feldlinien nachvollzogen werden. Entlang der Feldlinien können Elektronen beschleunigt werden. Man kann nun also untersuchen, ab wann ein eingebrachtes Startelektron auf dem Weg zur positiven Spitze eine Anzahl von $1 \cdot 10^8 \text{ e}^-$ erzeugt. Hierbei wird berücksichtigt, dass die Lawine selber einen feldverzerrenden Effekt ausübt.

Auf diese Art und Weise kann nun die zeitliche Änderung der Feldstärke an einer Fangstange im Hochspannungslabor und der Natur nachgestellt und gleichermaßen die Entwicklung des kritischen Volumens vor den Spitzen beobachtet werden.

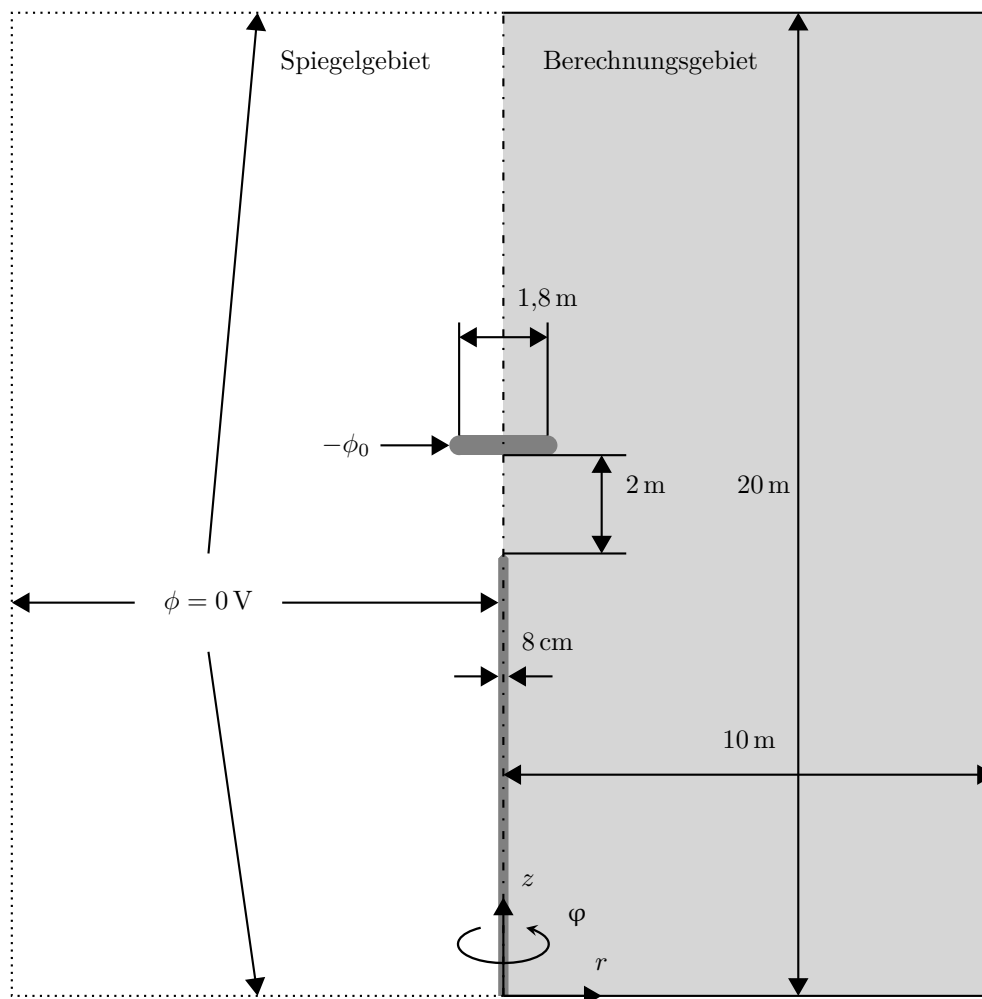
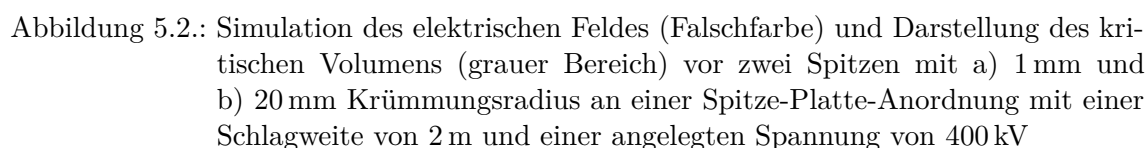


Abbildung 5.1.: Abmaße der Simulationsanordnung mit Randbedingungen zur Berechnung der elektrischen Feldstärke unmittelbar vor der Spitzenelektrode

$$U = 400 \text{ kV}, V_{\text{krit}} = 5,78 \text{ cm}^3 \quad U = 400 \text{ kV}, V_{\text{krit}} = 10,28 \text{ cm}^3$$


49

der Spitze. Da bei einer einfachen Betrachtung die Ladung Q eine skalare Größe ist, können die Kurven qualitativ verglichen werden. Abbildung 5.3 zeigt den Vergleich und demonstriert vor allem den entscheidenden Unterschied der Feldbeanspruchung im Labor und in der Natur. Während die Feldstärke im Labor zu Beginn schnell und im Anschluss immer langsamer ansteigt, ist es in der Natur genau umgekehrt. In der Folge kommt es in der Natur erst sehr viel später zu einem kritischen Volumen, welches dann aber sehr schnell zunimmt.

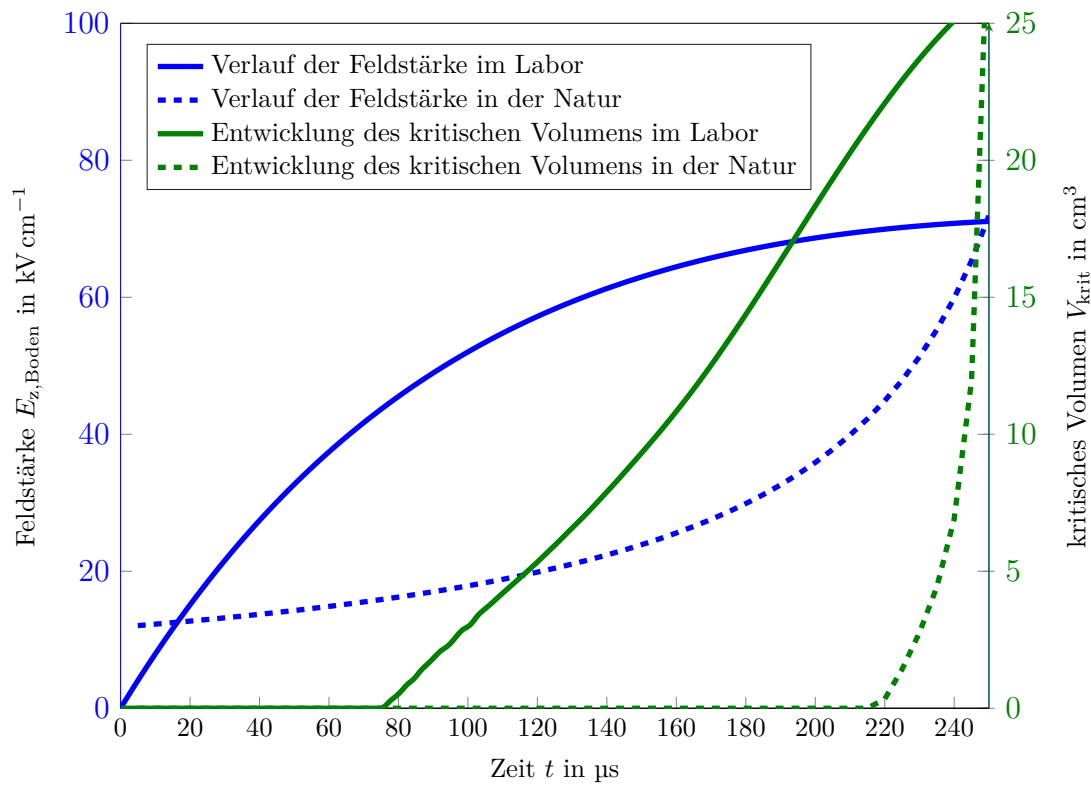


Abbildung 5.3.: Entwicklung des kritischen Volumens an einer runden Elektrode mit simulierten Feldstärken in der Natur und im Labor mit einer angenommenen Einsetzfeldstärke $E_i = 44 \text{ kV cm}^{-1}$

5.3. Schlussfolgerung

Das künstliche Einbringen von Vorentladungen, bevor es überhaupt zu einem kritischen Volumen kommt, beispielsweise durch eine aktive Blitzfangstange, kann keine Lawine erzeugen, die die kritische Elektronenzahl für den Streamermechanismus

übersteigt. Besonders an spitzen Elektroden können zwar sehr hohe Feldstärken entstehen. Wenn der Leitblitz noch sehr weit entfernt ist, ist diese hohe Feldstärke auf einen sehr kleinen Raum beschränkt, was dazu führt, dass zum einen die Einsetzzeit stark streut und zum anderen die Ladung so gering ist, dass es zu keiner Kanalbildung kommt. Es scheint daher sinnvoller zu sein, größere Elektrodenkonturen zu verwenden, die sich am kritischen Radius orientieren. Zu ganz ähnlichen Erkenntnissen kommt Cooray. Er beschreibt, dass es an Spitzenradien, die kleiner als 0,35 m sind, keinen Sinn ergibt künstliche Vorentladungen zu erzeugen. Erst bei Spitzenradien, die größer sind als 0,35 m, bewirken Vorentladungen einen Streamer, der in der Lage ist, zu thermoionisieren und so in einen Leitblitz umzuschlagen. Cooray und Akyuz halten es im günstigsten Fall für möglich, einen Reichweitenvorteil für eine Fangentladung von maximal 30 % zu erhalten [AC 2001]. Für einen Blitz der Stromstärke 30 kA mit einer Enddurchschlagstrecke von etwa 91,2 m wird die Fangentladung somit 45,6 m lang und könnte somit bestenfalls 59,3 m lang werden, also um etwa 13,7 m anwachsen, womit man jedoch noch sehr weit von den Angaben der unkonventionellen Blitzschutzsysteme entfernt ist. In einer späteren Veröffentlichung kommen Becerra und Cooray auf einen Reichweitenvorteil von nur noch 10 % [BC 2006b].

6. Konzeptionelle Umsetzung

Um den Konflikt in Hinblick auf neuartige Blitzschutzkonzepte zu lösen, muss die Wissenschaft die Wirkungszusammenhänge bei der Entstehung von Fangentladungen in der Natur untersuchen. Eine solche Untersuchung gibt es bisher nicht. Aus diesem Grund soll nun die konzeptionelle Umsetzung vorgestellt werden, die eine solche Untersuchung mit nur geringen disponiblen Mitteln erlaubt. Es ist interessant, ab wann es an der Blitzfangstange zu allerersten Entladungen nach dem Streamermechanismus kommt und wie viel Ladung diese umsetzen. Für die Untersuchung sind daher zwei Dinge notwendig. Zum einen wird ein Messsystem benötigt, welches die Entstehung einer Fangentladung erfassen kann. Dieses muss gewissen Randbedingungen genügen. Zum Zweiten werden natürliche Fangentladungen benötigt, die durch reale Abwärtsblitze erzeugt werden. Um die Ausbeute zu maximieren, werden zwei Strategien verfolgt. Da es sich um ein sehr seltenes Ereignis handelt, muss zum einen sehr genau überlegt werden, wo eine solche Messeinrichtung zu installieren ist. Hierbei kommt mit einem erweiterten DEGM ein neues Werkzeug zum Einsatz. Zum anderen wird eine Vielzahl von Messeinrichtungen gebaut und installiert, um die Wahrscheinlichkeit für auswertbare Messergebnisse zu steigern.

6.1. Erwartete Messdaten

Für die Untersuchung soll im Kern eine Vorentladungsmessung (Teilentladungsmessung) an einer Blitzfangstange durchgeführt werden. Hierbei muss die Messung die Vorentladungen vor dem Einschlagzeitpunkt aufzeichnen sowie den Blitzstrom, der auf die im Leitblitz vorhandene Ladung schließen lässt. Die Ladung, welche in den ersten 100 μs nach dem Blitzeinschlag ausgeglichen wird, ist diejenige, die im Leitblitzschlauch gespeichert ist [CRT 2007]. Umweltparameter wie Temperatur, Feuchte

und Druck können minutengenau über den Deutschen Wetterdienst (DWD) abgefragt werden. Eine Messung könnte dann so aussehen wie in Abbildung 6.1 dargestellt.

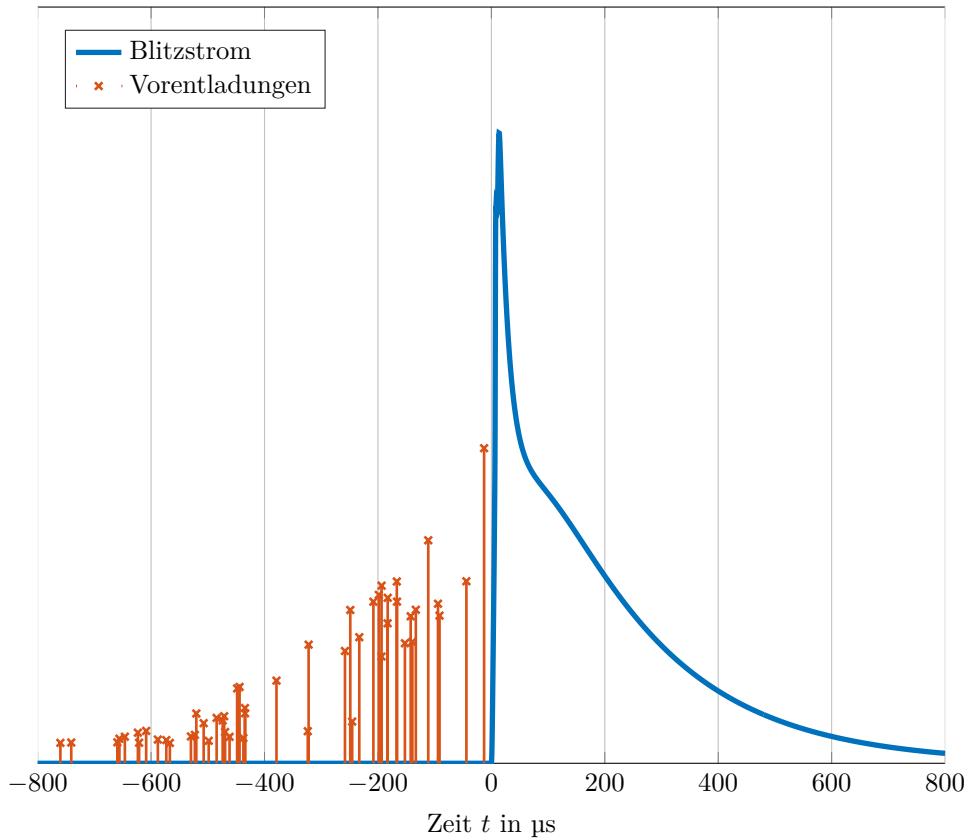


Abbildung 6.1.: Schematische Darstellung der erwarteten Messdaten mit angedeuteten Vorentladungen (orange) und einem anschließenden Hauptblitzstrom (blau)

Da die Messung nicht nur einfache Vorentladungsereignisse registriert sondern auch deren Kurvenverläufe sehr exakt aufzeichnet, können nicht nur Impulshöhen und Abstände verglichen und ausgewertet werden, sondern auch deren Frequenzspektren. Hiermit lassen sich dann überlagerte Analysen, wie die 3CFRD durchführen, um noch genauere Daten über Entstehungsort und Ausbreitung heraus zu finden. Die Analyse ermöglicht es, die gemessenen Impulse dem Rauschband oder Entladungen, die an der Fangtangenspitze entstanden sind, zuzuordnen. Leider ist die Messaufgabe sehr anspruchsvoll, weswegen es noch keine vergleichbaren Untersu-

chungen gibt. Was einen konkret erwartet ist also unklar. Es handelt sich bei dieser Form der Untersuchung um Pionierarbeit.

6.2. Konzept zur Messdatenerfassung

Es wird eine Messeinrichtung entwickelt, welche die elektrischen Vorentladungen an einer Blitzfangstange sowie die Hauptentladung des Blitzes registrieren kann. Die Messdaten werden dabei potentialfrei über Stromwandler gemessen. Hierfür werden eine Rogowskispule für den Hochstrombereich und ein HFCT für die Vorentladungen eingesetzt. Beide Signalaufnehmer lassen sich klappbar um die Fangstange oder eine einzelne isolierte Ableitung herum legen. Die Anbringung erfolgt vor der ersten Ableitungsaufteilung, also üblicherweise am Fuß der Fangstange. Die Signalaufnehmer sind explizit auf ihren Erfassungsbereich hin optimiert. Abbildung 6.2 zeigt die Bandbreiten beider Signalaufnehmer.

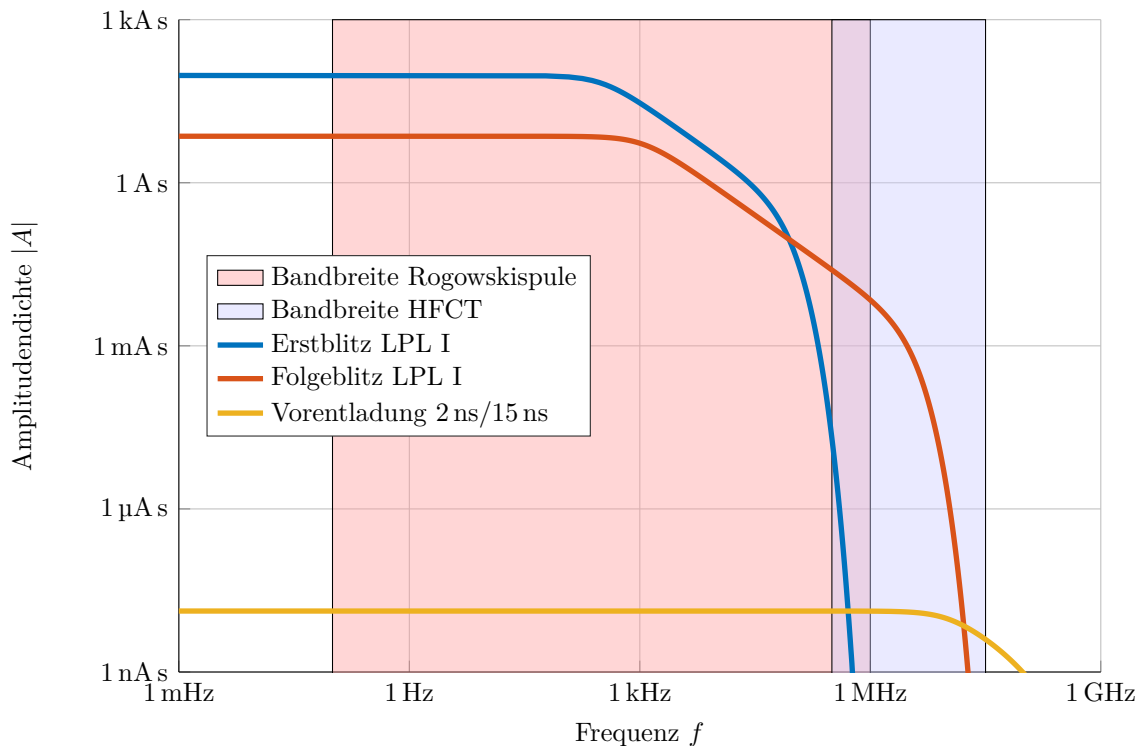


Abbildung 6.2.: Bandbreiten beider Signalaufnehmer und die erwarteten Amplitudendichten (nach [IEC 62305-1] und [Kön 1993]) der Messgrößen für die Rogowskispule (rot und blau) und den Hochfrequenzstromtransformator (gelb)

Die Datenerfassung findet in unmittelbarer Nähe der Fangstange statt, um lange Signalleitungen und Störeinkopplungen zu vermeiden. Die eigentliche Messeinrichtung, an die die beiden Signalaufnehmer angeschlossen sind, ist in einem runden Aluminiumzylinder mit einem Durchmesser von 20 cm und einer Länge von 35 cm untergebracht. Sie wird über eine Solarzelle versorgt. Über einen Akku kann die Messeinrichtung bis zu fünf Tage ohne Sonne auskommen. Vor den Folgen eines Blitzschlages ist die Messeinrichtung durch verschiedene Schutzmaßnahmen geschützt. Die Messeinrichtung speichert die Blitzereignisse und ihre Vorentladungen auf einer SD-Karte. Bei einem Messerfolg sendet sie eine SMS. Darüber hinaus können die Daten über GPRS heruntergeladen werden. Die Messeinrichtung ist also ganz speziell auf ihre Messaufgabe hin optimiert. Da zudem sehr viele Messeinrichtungen gebaut werden sollen, muss die Messeinrichtung kostenminimiert konzipiert werden, weswegen nahezu alle Komponenten selbst entwickelt werden. Die Messeinrichtung soll mindestens den folgenden Anforderungen genügen:

- Potentialfreie Strommessung des Blitzstromes von -100 kA bis 100 kA in einem Frequenzbereich von 1 Hz bis 500 kHz . Hierbei sollen mindestens 10 ms vor und nach dem Auslöseereignis aufgenommen werden. Die Auflösung sollte mindestens 100 A Bit^{-1} betragen.
- Potentialfreie Strommessung der Vorentladungen von -20 A bis 20 A in einem Frequenzbereich von 500 kHz bis 10 MHz . Hierbei sollen mindestens 10 ms vor und nach dem Auslöseereignis aufgenommen werden. Die Auflösung sollte mindestens 1 mA Bit^{-1} betragen.
- Ein bipolarer Auslöser soll die Messung beim Über- oder Unterschreiten $\pm 3\text{ kA}$ starten.
- Die Messeinrichtung soll der Feldbeanspruchung von Folgeblitzen standhalten und Temperaturen von -30 °C bis 60 °C widerstehen.
- Die Messeinrichtung muss über ein proprietäres System fern-wartbar sein.
- Die Kosten sollten so gering wie möglich sein.

6.3. Konzept zur Vergrößerung der Anzahl von Messereignissen

Um Messdaten zu erfassen, muss der designierte Messort instrumentiert werden, bevor ein Blitz in ihm einschlägt. Da das Auftreten für einen negativen Abwärtsblitz äußerst selten ist und die Wahrscheinlichkeit für ein Blitzereignis nicht signifikant beeinflusst werden kann, müssen viele Messorte instrumentiert werden. Abbildung 6.3 schätzt ab, mit wievielen Blitzereignissen an einer bestimmten Zahl von Fangstangen mit einer angenommenen Fangstangenhöhe zu rechnen ist.

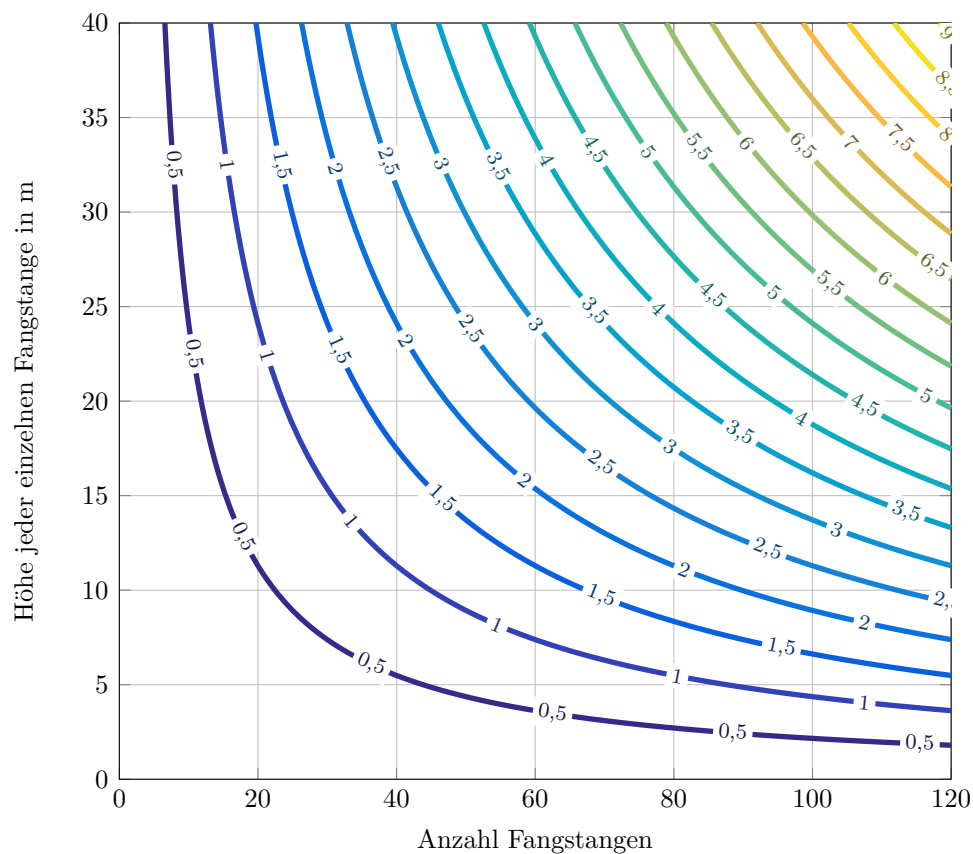


Abbildung 6.3.: Abschätzung der Blitzereignisse pro Jahr in Abhängigkeit von Anzahl und Höhe der Fangstangen, bei einer angenommenen Erdblitzdichte von $N_g = 3,5$, berechnet mit dem eDEGM (Kapitel 8.2.1)

Um die Effektivität jedes einzelnen Messortes abzuschätzen, wird eine neue Simulationsmethodik zum Einsatz kommen. Die eingesetzte Simulationsmethodik fußt

auf einer neuen Modellvorstellung und wird in dieser Arbeit zu einem anwendbaren und praktischen Werkzeug weiter entwickelt. Es wird im Anschluss dazu genutzt, um die Einfangwahrscheinlichkeiten von Fangstangen berechnen zu können. Sie wird darüber hinaus zeigen, an welcher Stelle eine Fangstange aufzustellen ist, um ihre Einfangwirksamkeit zu maximieren. Natürlich wird die lokalen Blitzdichte ermittelt, sie ist jedoch ein sehr unzuverlässiger Faktor bei der Abschätzung und Maximierung von Messergebnissen. Es wird sich zeigen, dass durch die richtige Wahl des Aufstellortes einer Fangstange die Ausbeute signifikant beeinflusst werden kann.

7. Beschreibung des Messsystems

7.1. Theoretische Vorbetrachtungen

In diesem Kapitel wird beschrieben, welche Randbedingungen ein Messsystem erfüllen muss, damit die gesteckten Ziele auch erreicht werden können. Eine überlagerte sehr wesentliche Randbedingung ist, dass die Messeinrichtung nur geringe Kosten verursachen darf, um sie leicht und oft vervielfältigen zu können.

7.1.1. Eingangsgröße: Blitzstrom

Für die Entladungen an einer Blitzfangstange ist die angreifende Feldstärke ursächlich. Diese wird durch den herannahenden Leitblitz und die in ihm befindliche Ladung erzeugt. Die Feldstärke unmittelbar an einer Fangstange zu messen ist jedoch sehr schwierig, da diese lokal durch Raumladungszonen beeinflusst wird. Üblicherweise werden Feldstärkemessungen ab einer Entfernung von 50 m durchgeführt [HH 1998]. Die für die Feldstärke verantwortliche Ladung befindet sich größtenteils im Kopf und der Hülle des Leitblitzes [Ign 2016]. Diese Ladung wird durch den Hauptblitz in den ersten 100 μ s neutralisiert. Die Zeit, die benötigt wird, um diese Ladung zu neutralisieren, ist davon abhängig, wie schnell der Kern des Leitblitzes geerdet wird und wie lang der Entladungskanal ist.

Zwar gibt es gute Korrelationen zwischen Stoßstromhöhe und Ladungsinhalt, es ist aber ratsam, nicht nur den Erstblitz, sondern den gesamten Blitzstromverlauf zu erfassen, um qualifizierte Aussagen über das gesamte Blitzereignis treffen zu können. Da das Messsystem nicht an hohen Türmen installiert werden soll, müssen keine Auf- und Abwärtsblitze unterschieden werden, es ist jedoch von Vorteil, wenn auch niederfrequente Dauerströme erkannt werden. Das Messsystem muss keine weiteren

Stromkomponenten, wie Folgestoßströme oder Langzeitströme erfassen. Um einen unipolaren Doppelsexponentialimpuls sinnvoll aufzuzeichnen, sollte das Messsystem eine Bandbreite aufweisen, die etwa zehnmal höher ist als die Grenzfrequenz des Impulses. Um diese Frequenz auflösen zu können, sollte diese nach dem Nyquistkriterium mit einer doppelten Frequenz abgetastet werden. In der Realität ist jedoch eine Überabtastung ratsam.

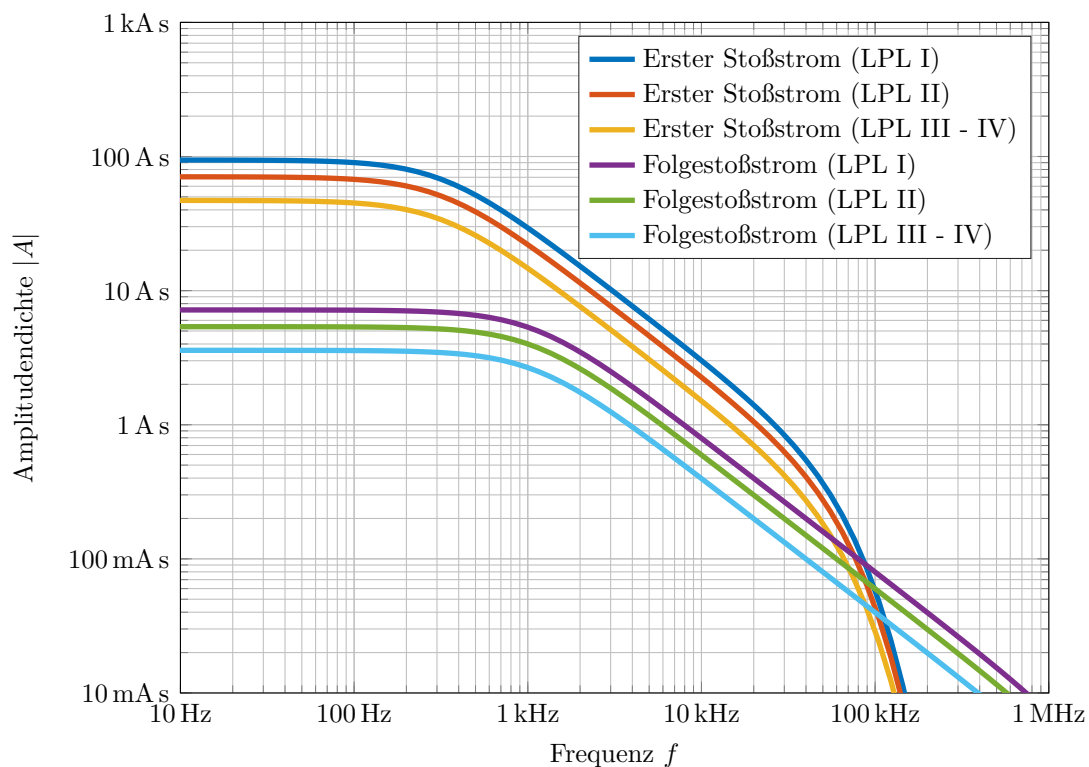


Abbildung 7.1.: Amplitudendichtespektren von ersten und Folgestromstößen entsprechend den vier Blitzschutzklassen (LPL) nach [IEC 62305-1]

Abbildung 7.1 zeigt die Amplitudendichtespektren der Haupt- und Folgeblitzströme entsprechend den vier Blitzschutzklassen (LPL). Erzeugt werden die Spektren mit der in der Norm abgebildeten Stoßstromform, welche sich mit einer Vereinfachung der Heidlerfunktion berechnet. Die Funktion ist im Wesentlichen ein Doppelsexponentialstromstoß, welcher einen einstellbaren Verzug besitzt. Ein Messsystem mit einer Bandbreite von bis zu 1 MHz ist ausreichend, um alle Blitzereignisse sinnvoll aufzulösen. Bei einem induktiven Auskopplungsverfahren muss man darüber hin-

aus auf die untere Grenzfrequenz achten. Fehlt der Gleichanteil in einem Impuls, wird dieser unweigerlich durchschwingen. Je schmaler die Bandbreite ist, desto weniger Impulsinformationen können erhalten werden. Die untere Grenzfrequenz eines Messsystems, welches die Impulse im Zeitbereich auswertet, sollte 1 Hz oder weniger betragen.

Möchte man die Ladung und weitere Parameter im Zeitbereich sinnvoll ermitteln, so ist weiterhin eine gute Amplitudendiskretisierung erforderlich. Bei Blitzströmen besteht das Problem darin, dass die Amplituden in einem Bereich einer Dekade streuen können und auch die Polarität nicht bekannt ist. Aus diesem Grund kann es bei einer niedrigen Auflösung zu starken Fehlern kommen. Da überwiegend negative Blitzstoßströme auftreten und diese in weniger als 3 % aller Fälle Blitzstromscheitel mit einer Höhe von mehr als 100 kA annehmen, sollte der Messbereich -100 kA bis 100 kA betragen. Die effektive Amplitudenauflösung sollte mindestens $1\text{ kA}\text{Bit}^{-1}$ betragen, das bedeutet bei einem Messbereich von -100 kA bis 100 kA eine Auflösung von mindestens 8 Bit. Da gängige Analog-Digital (AD)-Wandler jedoch in einem Bereich bis zu 2 Bit rauschen, muss die Auflösung mindestens 10 Bit betragen. Zwar ist das Blitzereignis nur auf einige hundert Mikrosekunden beschränkt, um eine zu frühe oder zu späte Auslösung auszuschließen, sollte jedoch ein großer zeitlicher Bereich vor und nach dem Auslöseereignis aufgelöst werden.

7.1.2. Eingangsgröße: Vorentladung

Für die Amplituden der Vorentladungen gibt es unterschiedliche Angaben, die zum Teil stark streuen. Es werden Stromhöhen in einem Bereich von $0,02\text{ A}$ bis 20 A erwartet. Gemessen werden sollen jedoch nur die Ladungsinhalte der Vorentladungen. Betrachtet man die Amplitudendichtespektren typischer Koronaentladungen aus Abbildung 2.4, erkennt man, dass die Impulse wesentlich breitbandiger sind und kleinere Amplituden haben als die der Hauptentladung. Sie sind daher wesentlich empfindlicher gegenüber äußeren Störeinflüssen. Die Bandbreite sollte mindestens in einem Bereich von 5 MHz liegen. In der Folge sollte die Abtastrate möglichst hoch sein.

Ein zweites Problem ist die Amplitudenauflösung. Um den Ladungsinhalt zu ermitteln, müssen die Impulse von einem AD-Wandler digitalisiert werden. Dieser verfügt über eine lineare Amplitudenauflösung. Typische Teilentladungen besitzen

Ladungsinhalte von nur einigen Picocoulomb. Ihre Strommaxima liegen im Bereich von einigen Milliampère, und ihre Form orientiert sich qualitativ an denen aus Abbildung 2.4.

Die Vorentladungen an Blitzfangstangen jedoch werden mehr Ladung umsetzen. Erwartet werden Impulsleistungen zwischen 1 nC und 1 µC. Problematischerweise kann während einer Messung der Messbereich nicht verändert werden, da die Ereignisse einmalig sind. Aus diesem Grund muss eine sehr hohe Amplitudendiskretisierung erfolgen. Es gibt jedoch die Tendenz, dass Impulse, die eine höhere Ladung umsetzen, schmalbandigere Spektren aufweisen. Die Verflachung der Impulse hängt im wesentlichen mit der größeren Ausdehnung der Streamerzone zusammen. Abbildung 7.2 zeigt den Ladungsinhalt positiver Streamer in Abhängigkeit von dessen geometrischer Länge. Bei einem Microcoulomb beträgt die Länge der positiven Streamerzone bereits schon 16 cm. Die Berechnungen wurden mit dem Ersatzladungsverfahren unter der Bedingung eines gleichbleibenden Potentialgradienten von 500 kV m^{-1} angefertigt [SSW 1974], [Bey 1986].

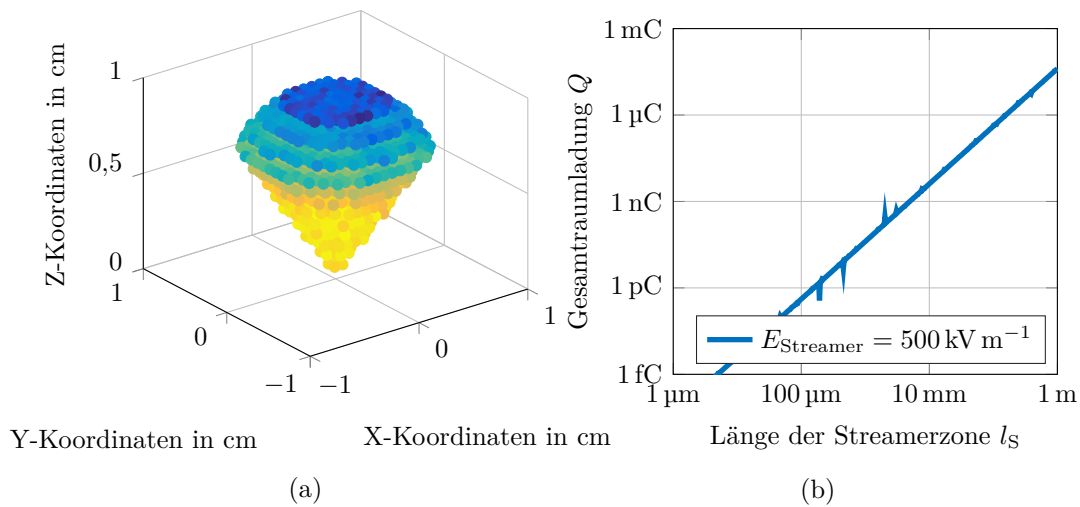


Abbildung 7.2.: Nachbildung einer Streamerzone mit Punktladungen und Lösung mit der CSM (links) und Gesamtladung innerhalb einer Streamerzone in Abhängigkeit von ihrer geometrischen Länge (rechts)

Mit dieser Annahme ist es erklärbar, dass die Les-Renardières-Gruppe bei ihren Messungen erste Streamerentladungen mit Stromhöhen von bis zu 1,5 A und in Folgeentladungen Stromscheitel im Bereich von 10 A ermitteln konnte [Gro 1972] [Gro 1977].

Das bedeutet, dass hochfrequente Stromimpulse von bis zu 10 A mit einer Bandbreite von mindestens 5 MHz bei einem hoch dynamischen Messbereich ausgekoppelt werden müssen. Eine Auflösung von 12 Bit ergäbe bei einem Scheitelwert von ± 10 A eine Auflösung von $4,9 \text{ mA Bit}^{-1}$. Da die zu messenden Impulse vor dem eigentlichen Blitzeinschlag auftreten, muss ein Messbereich vor dem eigentlichen Blitzeignis aufgenommen werden. Hierbei sollten mindestens zehn Millisekunden erfasst werden. Dies ist die Zeit, die ein Abwärtsblitz für die letzten 2 km zum Erdboden benötigt.

7.1.3. Datenerfassungseinheit

Die Datenerfassungseinheit muss in der Lage sein, zwei Messkanäle dauerhaft abzutasten und diese dauerhaft in einem Ringspeicher abzuspeichern. Weiterhin muss eine Logik entscheiden, welche Daten dauerhaft abgespeichert werden. Da Blitzeignisse sehr selten sind, ist es nicht erforderlich, dass der Dauerspeicher schnell ist. Genauso wenig ist es erforderlich, die Daten über mobile Kommunikation schnell verfügbar zu machen oder an Ort und Stelle zu verarbeiten. Die Messeinrichtung muss jedoch robust sein gegenüber externen Störern. Sie sollte daher deterministisch arbeiten und von keinen übergeordneten Kontrollstrukturen abhängig sein.

7.1.4. Stromversorgung

Die Messeinrichtung muss mit Energie versorgt werden. Es hat sich gezeigt, dass die Akzeptanz gegenüber einer Netzeinspeisung äußerst gering ist. Die Gebäudeverantwortlichen, die angesprochen wurden, sind aufgrund ihrer subjektiven Risikowahrnehmung gehemmt gewesen, dieses Projekt tatkräftig zu unterstützen. Die Gefahr von verschleppten Blitzströmen schien, trotz Schutzkonzept, nicht tragbar zu sein. Auch um den Aufstellort möglichst variabel zu halten, ist eine autarke Stromversorgung zu projektieren. Da Gewitter üblicherweise während der Sommermonate auftreten, die von hohen Sonnenscheindauern begleitet werden, erscheint es sinnvoll, die autarke Stromversorgung mit einem Solarmodul herzustellen.

7.1.5. Feldstärken am Aufstellort

Eine Messeinrichtung, welche in unmittelbarer Nähe des Blitzeinschlagortes arbeiten soll, wird dem vollen elektro-magnetischen Feld ausgesetzt sein. Im unmittelbaren Nahfeld werden die elektrischen und magnetischen Felder noch getrennt voneinander auftreten. Hierbei sind zwei relevante Fälle zu betrachten. Unmittelbar vor dem Blitzeinschlag und während der Blitzentladung.

Nähert sich ein Leitblitz dem mutmaßlichen späteren Einschlagort, wird die elektrische Feldstärke in Bodennähe angehoben. Eine sehr einfache Abschätzung liefert die Berechnung einer Linienladung, welche sich mit $v_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ m s}^{-1}$ und einer Gesamtladung von 20 C auf den Boden zubewegt. Abbildung 7.3.a zeigt die berechneten Feldstärken an verschiedenen Beobachtungspunkten über einer perfekt leitenden Ebene.

Sobald der Hauptstrom zu fließen beginnt, wird die Ladung vom Erdboden aus neutralisiert. Dies geschieht mit einer Geschwindigkeit von $1,3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$. Hierbei treten nun erneut elektrische und vor allem magnetische Feldstärken auf. Die wohl gebräuchlichste Berechnungsgrundlage für die elektrischen und magnetischen Felder wurde durch Thottappillil aufgestellt [TRU 1997]. Die Gleichungen bestehen aus verschiedenen Feldkomponenten, welche die statischen, die induzierten und die abgestrahlten Felder retardiert berücksichtigen. Die Berechnung der magnetischen azimuthalen Feldkomponente am Einschlagort wurde in Abbildung 7.3.b sowohl unter Berücksichtigung aller Feldkomponenten als auch mit der sehr einfachen Betrachtung des Durchflutungsgesetzes berechnet. Qualitativ sehen beide Kurven ähnlich aus, wobei die einfache Betrachtung konservativer ist, was die Höhe der Feldbelastung angeht.

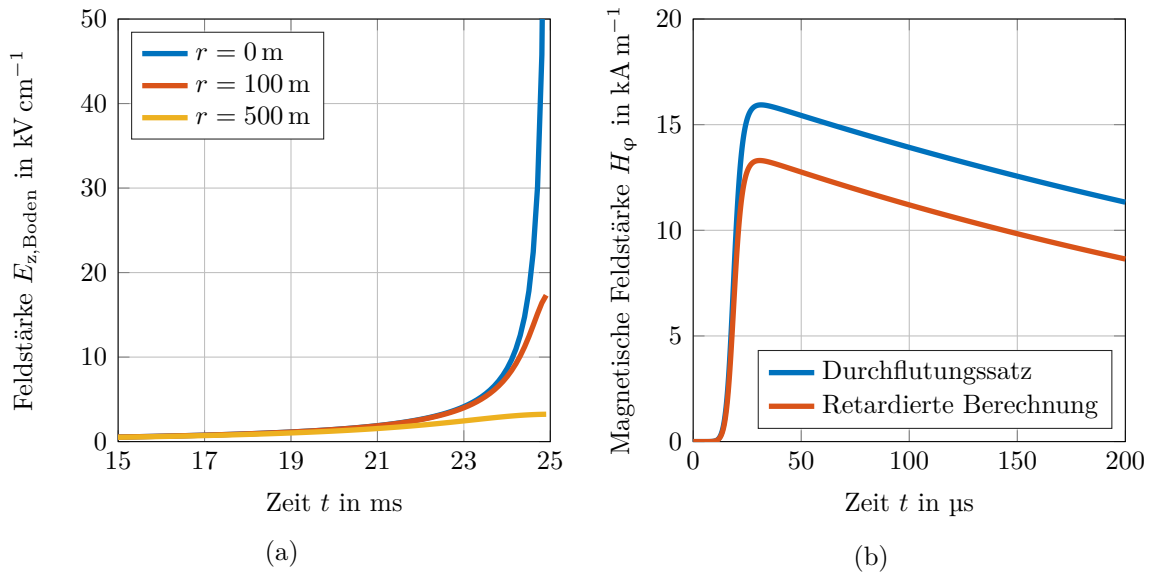


Abbildung 7.3.: a) Darstellung der elektrischen Feldstärken in z-Richtung über ebener Erde bei Annäherung eines Leitblitzes in verschiedenen Entfernungen (0 m, 100 m und 500 m) zum Einschlagpunkt und b) Vergleich der magnetischen azimuthalen Feldstärkekomponente während des Hauptblitzes in der Entfernung von 1 m zum Aufpunkt mit voller retardierter (rot) und einfacher (blau) Betrachtung mit dem Durchflutungssatz

7.2. Hochstromsensor zur Erfassung von Blitzströmen

Für eine nachträglich an einer Fangstange zu installierende Stromerfassung kommt nur ein induktives Messprinzip in Frage. Die gebräuchlichste Form hierbei ist die Rogowskispule, da sie einfach zu konstruieren, kostengünstig und robust ist. Mit dieser Spule können auch Ströme mit sehr schnellen Anstiegszeiten im Nanosekundenbereich gemessen werden. Sie ist eine gleichmäßig gewickelte Spule mit konstantem Querschnitt. Die Spule wird auf einen unmagnetischen Kern gewickelt, wo sie zu einem geschlossenen Kreis geformt wird und damit einen stromführenden Leiter umschließen kann. Die einfachste Form ist eine toroidförmige Luftspule. Nachteilig ist, dass mit dieser Spule nur zeitlich veränderliche Ströme gemessen werden können und viel Aufwand getrieben werden muss, sehr niederfrequente Signale auszukoppeln. Da jedoch lediglich Impulse im Fokus dieser Untersuchung stehen, sind die fehlenden Gleichanteile untergeordnet [Hus 2012].

Für die Untersuchungen sollte der Stromaufnehmer Erstblitze mit Amplituden von 100 kA in einem Frequenzbereich zwischen 1 Hz bis 1 MHz sinnvoll erfassen können.

7.2.1. Rogowskispule

Die Spule besteht aus einer angelassen Druckfeder aus Kupferberyllium, welche einen Außendurchmesser von $r_k = 2,5$ mm und eine Windungszahl von $N = 350$ aufweist. Sie besitzt eine Länge $l = 70$ cm. Bei kreisrunder Form ergibt sich ein Spulenradius von $r_s = 11,1$ cm. Um eine große flächige Windung zu vermeiden, wird die Spule an ihrem Ende mit einem inneren Rückleiter verbunden. In Abbildung 7.4 ist die projektierte Spule maßstabsgetreu skizziert.

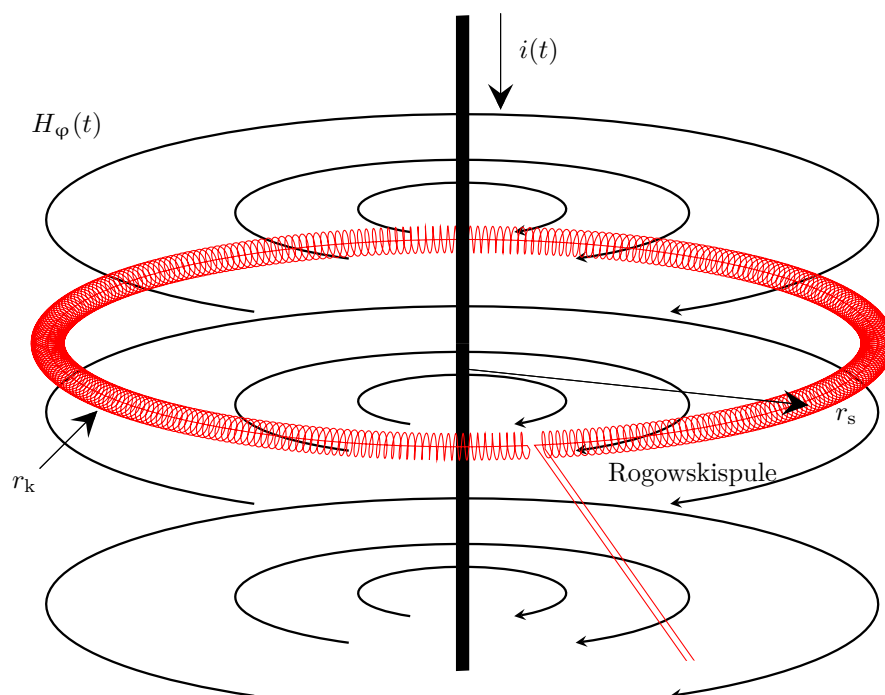


Abbildung 7.4.: Darstellung der Rogowskispule im azimutalen Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters, mit $N = 350$ Windungen, einem Spulenradius $r_s = 11,1$ cm, einem Querschnittsradius von $r_k = 2,5$ mm und einen inneren Rückleiter

Mit der idealisierten Annahme eines unendlich langen Leiters erzeugt ein Strom $i(t)$ in Gleichung 7.1 das Magnetfeld $H_\varphi(t)$, dessen Feldlinien nach dem Durchflutungs-

satz in der Rogowski-Spule auf Kreisen mit dem Radius r_s liegen. Hieraus lässt sich die Flussdichte mit Gleichung 7.2 berechnen.

$$H_\varphi(t) = \frac{i(t)}{2\pi r_s} \quad (7.1)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (7.2)$$

Die Wirkungsweise einer Rogowskispule lässt sich aus der ersten Maxwellschen Gleichung in Gleichung 7.3 herleiten.

$$\oint_{\vec{s}} \vec{E}(t) d\vec{s} = - \frac{d}{dt} \int_{\vec{F}} \vec{B}(t) d\vec{F} \quad (7.3)$$

Die sich ergebende Umlaufspannung lässt sich durch Gleichung 7.4 berechnen.

$$\oint_{\vec{s}} \vec{E}(t) d\vec{s} = U_{\text{ind}} \quad (7.4)$$

Gibt man eine kreisförmige Windungsfläche mit dem Radius r_k und einer Windungszahl N vor, kann nun die Gegeninduktivität M_k nach Gleichung 7.5 bestimmt werden.

$$M_k = N \frac{\mu_0 r_k^2}{2r_s} \quad (7.5)$$

Im Frequenzbereich wird die Ableitung zu einer Multiplikation mit der Kreisfrequenz ω , weshalb sich die induzierte Spannung nach Gleichung 7.6 bestimmt.

$$U_{\text{ind}} = \omega N \frac{i(t) \mu_0 r_k^2}{2r_s} \quad (7.6)$$

Die Gegeninduktivität der Rogowskispule beträgt $M_{\text{RC}} = 14,98 \text{ nV s A}^{-1}$ [RD 1993]. Sie ist auch ein Maß für die frequenzabhängige Sensitivität der Spule.

Die Isolation zwischen Innen- und Außenleiter weist hierbei eine hohe Stoßspannungsfestigkeit von ca. 10 kV auf, da bei Folgeblitzen zwischen der Spulenwindung und dem Innenleiter Spannungen bis zu 5 kV, je nach Höhe oder Steilheit der Stromimpulse, auftreten können. Abbildung 7.5 zeigt die erwarteten Spannungen am Ausgang der Spule bei verschiedenen Stoßstrombelastungen.

Das Dielektrikum der Spule besteht aus Silikon mit einem $\varepsilon_r = 2,8$. Über die Koppelkapazität der Windungen zum Innenleiter ergibt sich eine Kapazität (C_{RC}),

welche der Spule eine natürliche obere Grenzfrequenz einprägt. Diese liegt im Bereich von 14 MHz und ist damit ausreichend. Die Spule wird mit ihrem natürlichen Wellenwiderstand (R_d), welcher sich messtechnisch zu 178Ω ermittelt, abgeschlossen. Weiterhin wird der für den Integrator benötigte Widerstand (R_0) direkt an die Spule noch vor dem Anschlusskabel angeschlossen. Dies hat zwei Vorteile. Zum einen fällt über ihn die Hochspannung ab und wird nicht mehr in das Anschlusskabel verschleppt, und zum zweiten addiert sich die Kabelkapazität (C_K) der Integratorkapazität (C_1) hinzu, ohne einen natürlichen Tiefpass zu bilden [RD 1993]. Schematisch werden die erwarteten Überspannungen am Ausgang der Spule mit Belastung durch die Stromform, nach Heidlerfunktion, in Abbildung 7.6 gezeigt. Auch wenn Folgeblitze nicht im Fokus der Untersuchung stehen, muss die Spule den Anforderungen an die Stromänderung genügen.

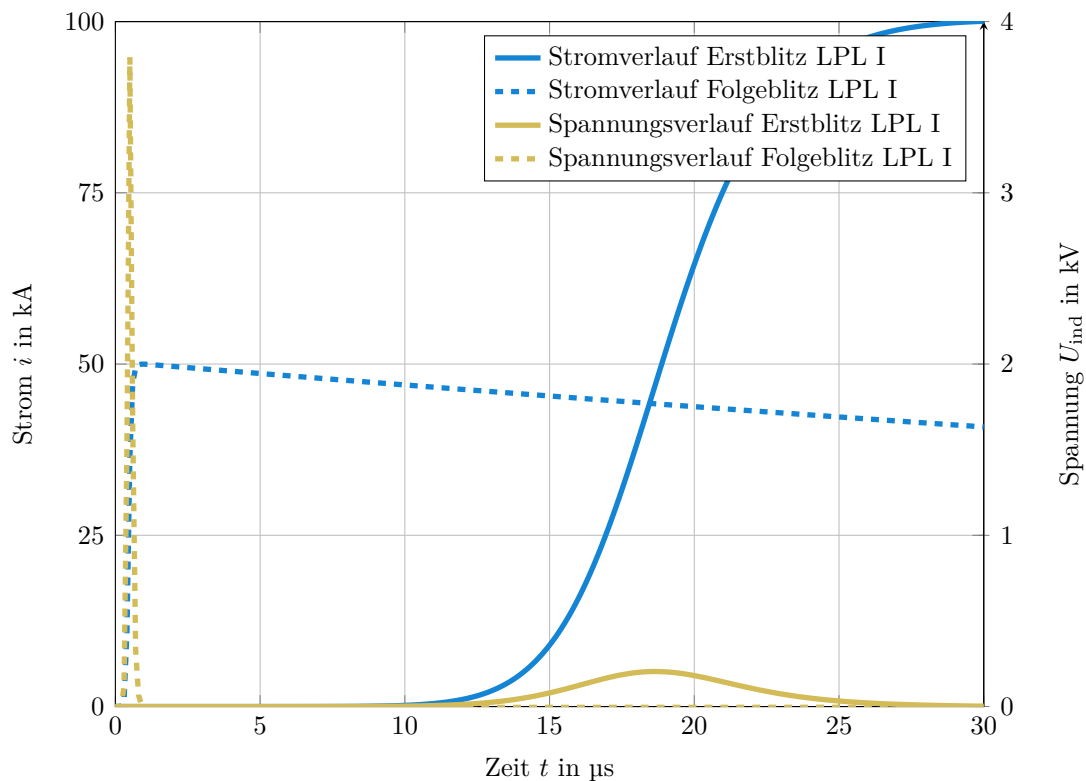


Abbildung 7.5.: Induzierte Spannungen am Ausgang der projektierten Spule bei Belastung mit Erst- (blau) und Folgeblitzen (beige) nach LPL I

7.2.2. Integrator

Die Spule liefert ein der zeitlichen Ableitung des Stromes proportionales Spannungssignal. Dieses muss integriert werden, um ein dem Strom proportionales Spannungssignal zu erhalten.

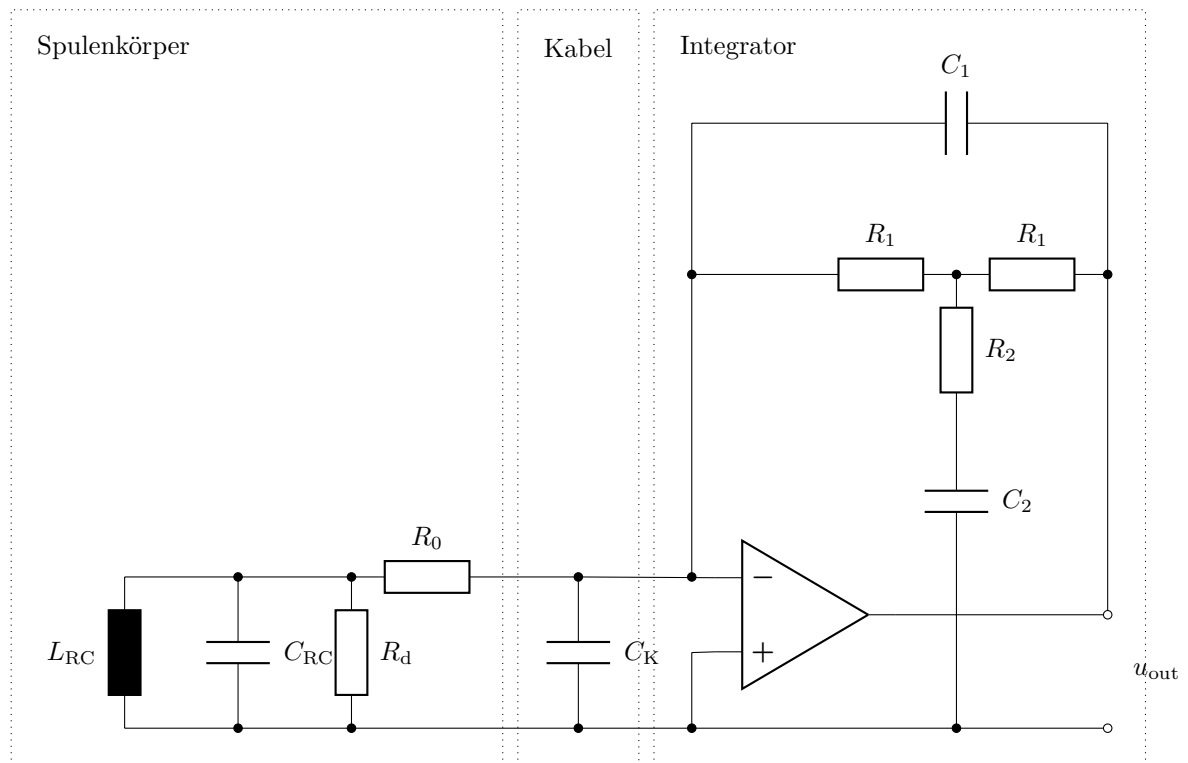


Abbildung 7.6.: Ersatzschaltbild von Rogowskispule, Anschlusskabel und Integrator mit Tiefpass im Rückkopplungspfad

Für die Integration können passive und aktive Integratoren eingesetzt werden. Passive Integratoren sind sehr einfach aufzubauen. Ihre maximale Verstärkung liegt jedoch bei 0 dB, was dazu führt, dass bei der geforderten Bandbreite über sieben Dekaden nach wenigen Dekaden bereits Rauschen das Nutzsignal überlagert. Im Unterschied zum passiven Integrator nutzt der aktive Integrator einen Operationsverstärker. In der Grundsaltung wird dem Rückkopplungspfad ein Kondensator (C_1) zugeschaltet. Der Integrator für dieses Projekt besitzt darüber hinaus im Rückkopplungspfad einen zusätzlich Tiefpass. Mit diesem Tiefpass wird das Rosa-Rauschen unterhalb

von 0,1 Hz gedämpft. Der projektierte Integrator ohne Spannungsversorgung, nachgeschaltetes Dämpfungsglied, Antialiasing-Filter und Symmetrierglied ist in Abbildung 7.6 zu sehen. Die Werte der verwendeten Bauteile für den Integrator sind in Tabelle B.1 zu finden. Die Übertragungsfunktion ist in Gleichung 7.7 beschrieben, wobei die Gleichspannungsverstärkung durch G_0 in Gleichung 7.8 berechnet werden kann [Men 2014].

Hierbei handelt es sich um ein lineares und zeitinvariantes System (Linear Time Invariant (LTI)), welches stabil ist und somit auf ein beschränktes Eingangssignal mit einem beschränkten Ausgangssignal antwortet.

$$G(s) = G_0 \frac{\left(\frac{R_1}{2} + R_2\right) C_2 s + 1}{(R_1 + R_2) R_1 (C_1 + C_K) C_2 s^2 + (R_1 (C_1 + C_K) + R_2 C_2) s + 1} \quad (7.7)$$

$$G_0 = -\frac{2R_1}{R_0} \quad (7.8)$$

Der Ausgang des Operationsverstärkers nimmt Werte von ± 12 V bei ± 100 kA an. Reale Messungen im Stoßstromlabor haben ergeben, dass der gesamte Messpfad in der Lage ist, Stoßströme mit einer absoluten Höhe von 110 kA bis 130 kA auszukoppeln.

7.2.3. Übertragungsverhalten

Es ist äußerst schwierig, das Übertragungsverhalten aller projektierten Baugruppen zu überprüfen, da es keinen Frequenzgenerator gibt, der Ströme im Kiloamperebereich und mit einigen Megahertz erzeugen kann. Die Baugruppen wurden daher einzeln gemessen. Abbildung 7.7 zeigt das Übertragungsverhalten des projektierten Integrators und das ideale induktive Verhalten der Rogowskispule. Das Frequenzverhalten des Integrators unterhalb von 0,1 Hz und oberhalb von 3 MHz ist messtechnisch nur schwer bestimmbar. Die Summe beider Signale im Diagramm ergibt dann das Übertragungsverhalten am Ausgang des Integrators, ohne Spannungsanpassung für den nachgeschalteten AD-Wandler. Dem Integrator ist ein Dämpfungsglied, ein Antialiasingfilter zweiter Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 2 MHz, ein Schutz und eine Signalanpassung für den differentiellen Eingang des AD-Wandlers

nachgeschaltet, welches die Spannungen am Eingang des AD-Wandlers auf $\pm 1\text{ V}$ begrenzt.

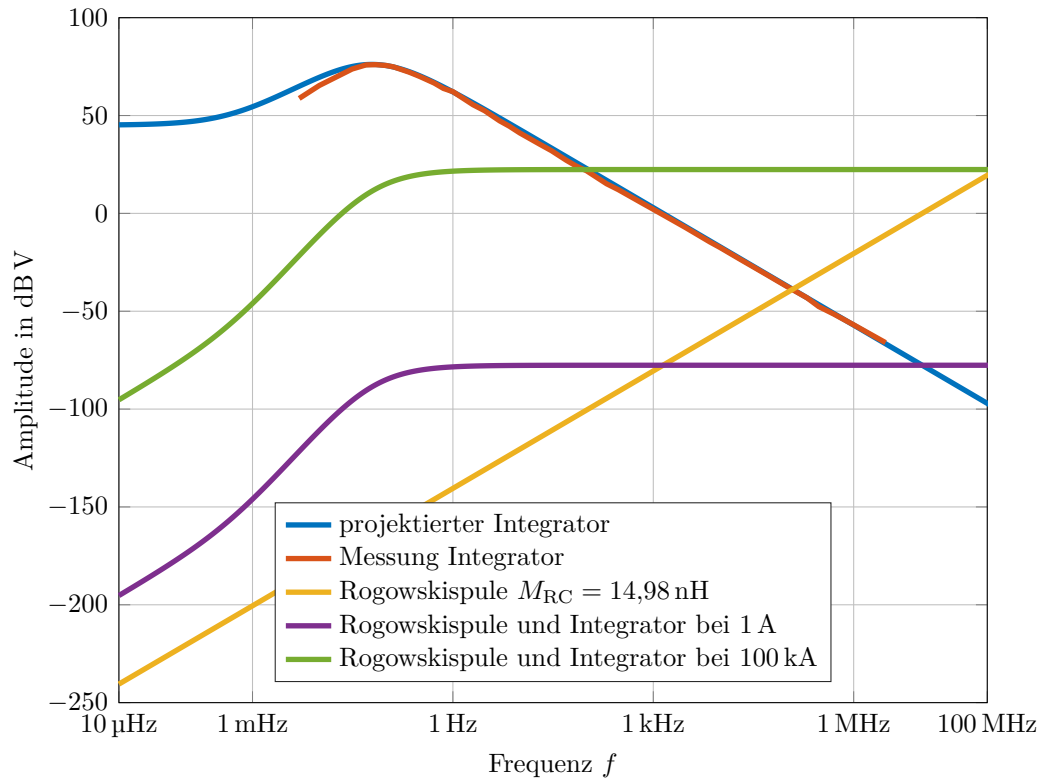


Abbildung 7.7.: Übertragungsfunktionen der Rogowskispule (gelb), des projektierten (blau) und gemessenen Integrators (rot) und das projektierte Übertragungsverhalten bei einer anregenden Stromstärke von 1 A (lila) und einer anregenden Stromstärke 100 kA (grün)

Das projektierte Übertragungsverhalten erzeugt eine Ausgangsverstärkung von 77,6 dBV und besitzt eine untere Grenzfrequenz von 0,246 Hz. Ein Signal mit einem Scheitelwert von 100 kA erzeugt demnach eine Ausgangsspannung von 13,18 V (22,8 dBV) am Integratorausgang. Das Übertragungsverhalten des kompletten Messpfades lässt sich nur mit einer möglichst steilen Stoßstrombelastung messtechnisch überprüfen, was in Abbildung 7.10 wiedergegeben ist.

7.2.4. Verifikation im Stoßstromlabor

Der $4/10\text{ }\mu\text{s}$ -Impuls wird im Stoßstromlabor der TU Darmstadt mit einem Doppelpotentialstoßstromgenerator erzeugt. Abbildung 7.8 zeigt die Messung des Impulses mit dem Referenzmesssystem und der LPDMU. Das Referenzmesssystem erfasst den Strom mit einer Rogowskispule (CWT1500) und digitalisiert das Signal mit Hilfe eines Oszilloskops (TDS3034). Die technischen Daten können den Tabellen im Anhang A.1 und A.2 entnommen werden.

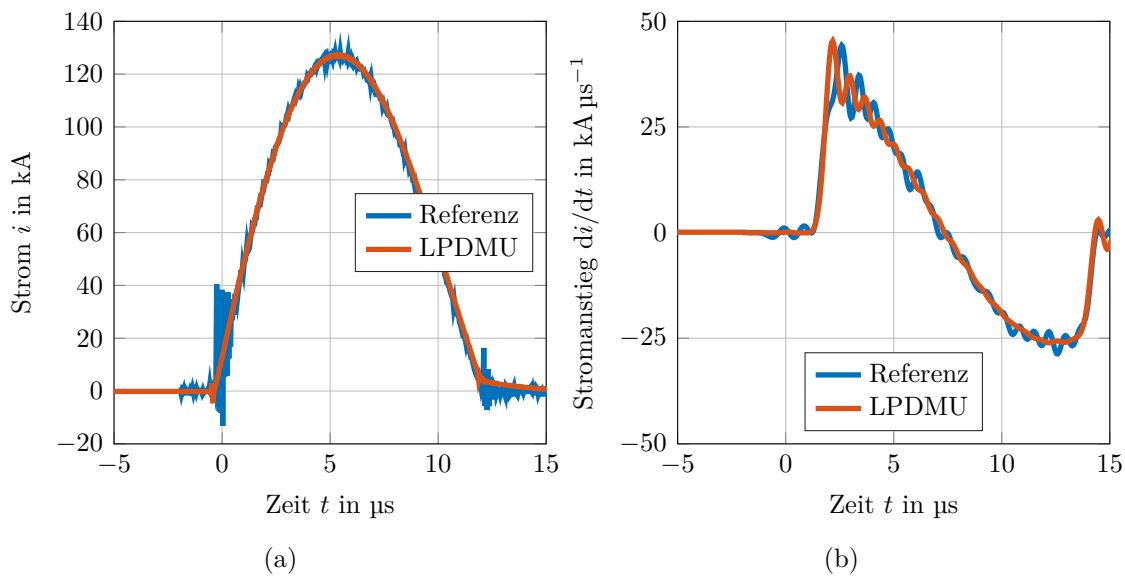


Abbildung 7.8.: a) Beispielhafte Messung eines Stoßstromes durch einen MO-Varistor der Form $4/10\text{ }\mu\text{s}$ mit der LPDMU und dem Referenzmesssystem und b) zeitliche Ableitung zur Ermittlung der Stromsteilheit

Man erkennt, dass der zeitliche Verlauf beider Messungen sehr gut übereinstimmt. Es kommt im Bereich des Stromanstiegs zu Einkopplungen, die vom Referenzsystem erfasst werden. Diese entstehen durch die Zündung des Lichtbogens in der Triggerfunkenstrecke. Eine ähnliche Einkopplung ist zu sehen, wenn der Lichtbogen wieder erlischt. Um die Stromsteilheiten auszuwerten, werden die Zeitsignale beider Messungen mit einem Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 50 kHz gefiltert. Die maximale Stromsteilheit kann in dieser Messung zu $45\text{ kA }\mu\text{s}^{-1}$ bestimmt werden. Um die Messunsicherheit zum Referenzmesssystem besser zu beurteilen, wurden

100 Stromstöße mit einer Stromhöhe von 30 kA vermessen. Abbildung 7.9 zeigt die Abweichung [Spe 2015].

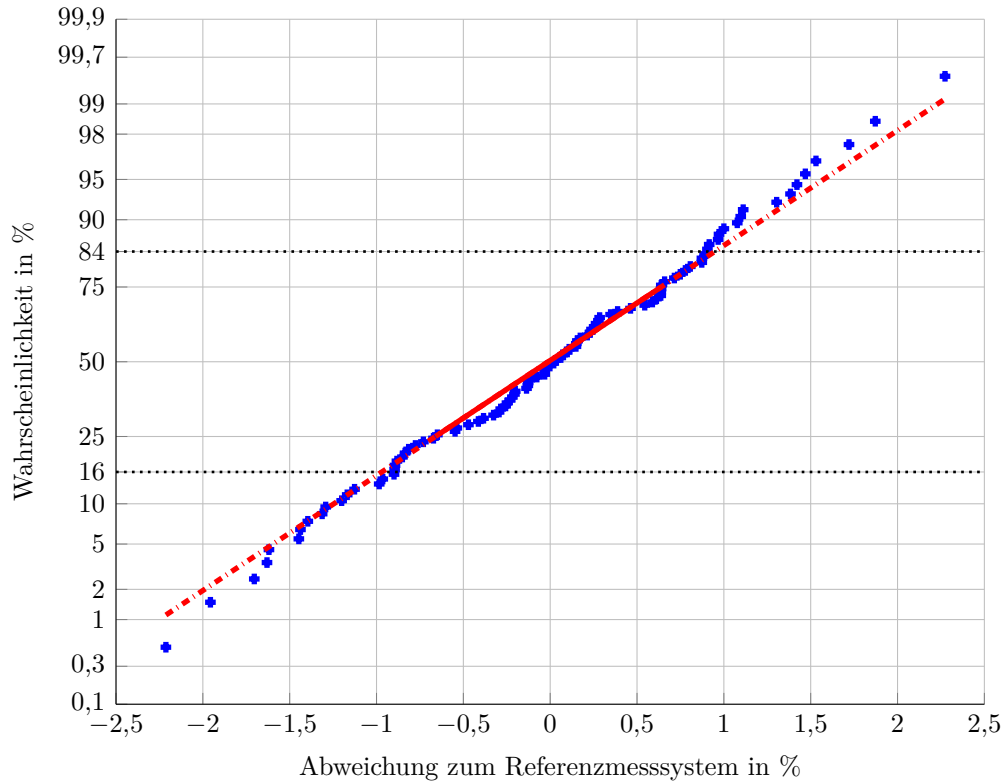


Abbildung 7.9.: Messung von 100 Stoßströmen bei 30 kA der Form $4/10\mu\text{s}$ mit einer Standardabweichung von $\pm 0,9\%$

In der Messung sind kaum qualitative Abweichungen zum Referenzmesssystem zu erkennen. Um genauer zu ermitteln, ob der Impuls richtig gemessen wird, wird die Messeinrichtung LPDMU so umprogrammiert, dass sie nur noch mit 5 MS s^{-1} abtastet und dabei den gesamten Speicherbereich ausnutzt. Die Gesamtmesszeit beträgt nun 13s. Der Stoßstromkreis wird nun nicht mehr mit einem MO-Varistor belastet, sondern mit einem linearen ohmschen Widerstand von 10Ω , um einen Doppexponentialstoßstromimpuls zu erhalten. Der so entstehende Doppexponentialstoßstrom ist in Abbildung 7.10 dargestellt. Von beiden Messsignalen wird das Amplitudendichtespektrum angefertigt. Da die Aufnahmedauer der Referenzmessung äußerst beschränkt ist, reicht das Amplitudendichtespektrum nur bis zu einigen zehn Kilohertz. Erweitert man den zeitlichen Verlauf künstlich, so lässt sich das ideale Frequenzverhalten eines Doppexponentialimpulses im Frequenzbereich erkennen.

Die Messeinrichtung LPDMU folgt diesem Verlauf weitestgehend. Ab einer Frequenz von 8 Hz lässt sich jedoch ein kapazitives Verhalten erkennen, was auf eine Schwebung des Offsets am Integratorausgang zurück geführt werden kann. Weiterhin ist eine Resonanz bei 112 Hz zu erkennen. Der Ursprung dieser Frequenz konnte nicht zweifelsfrei geklärt werden.

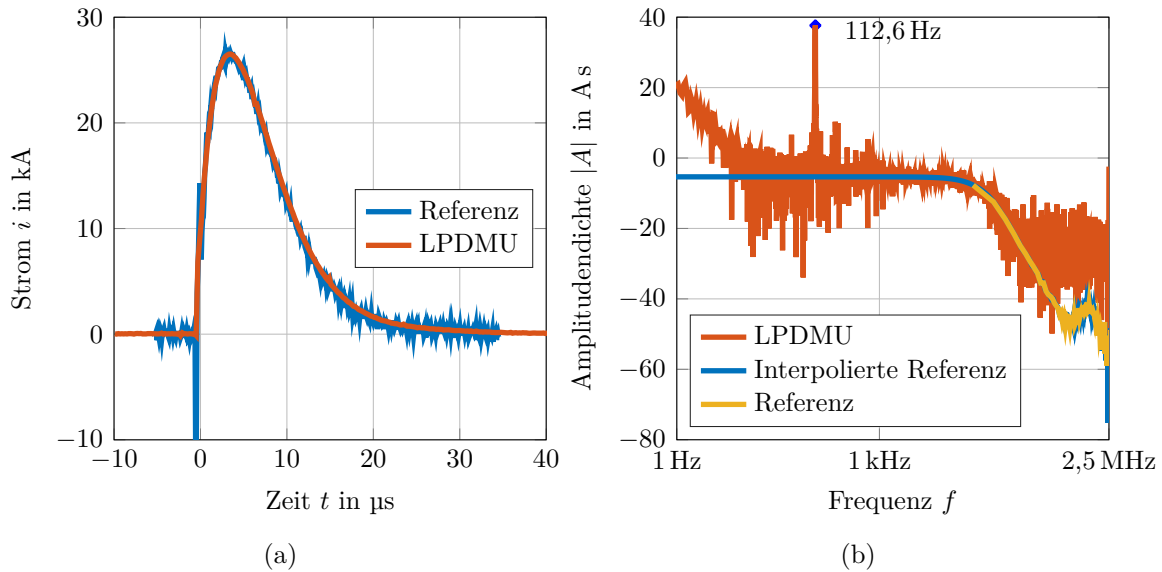


Abbildung 7.10.: Stoßstrom der Form 4/10 μs über einen ohmschen Widerstand im a) Zeitbereich und b) Frequenzbereich

7.3. Hochfrequenzstromtransformator

Der Hochfrequenzstromtransformator (HFCT) beruht auf dem Prinzip des Transformators. Er besitzt demnach eine primäre und eine sekundäre Windung. Anstelle eines Eisenkerns kommt ein ferrimagnetischer Werkstoff zum Einsatz. Hierdurch sind Ummagnetisierungsverluste infolge von Wirbelströmen vernachlässigbar. Der Kern konzentriert den magnetischen Fluss und erlaubt, bei sehr geringen Streuflüssen, eine sehr starke Kopplung zwischen beiden Windungen. Hochfrequenzstromtransformatoren werden zur Auskopplung von Teilentladungen eingesetzt, und es gibt verschiedene Hersteller, die hier kommerzielle Produkte anbieten [Ret 2006].

Aufgrund der hohen Selbstinduktivität des Kerns bildet die Induktivität zusammen

mit der Bürde einen natürlichen Hochpass, womit der Transformator selbstintegrierend wirkt. Ein spezieller Integrator ist somit nicht erforderlich [Rom 2012b].

7.3.1. Konzeption

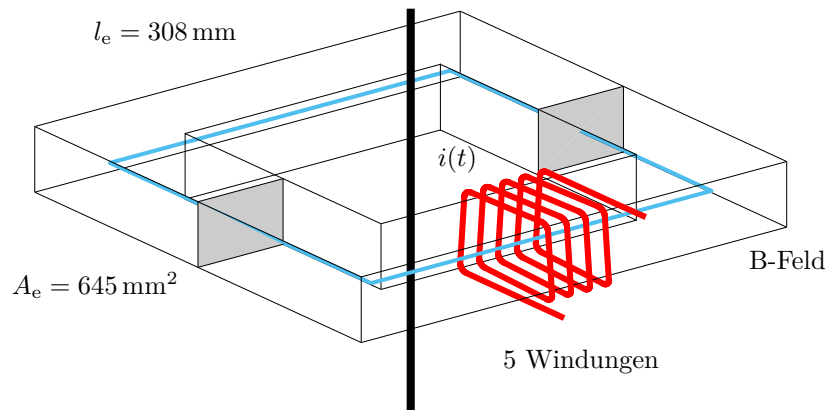


Abbildung 7.11.: Aufbau des Hochfrequenzstromtransformators mit den projizierten Randdaten

Der Aufbau eines Hochfrequenzstromtransformators ist in Abbildung 7.11 dargestellt. Für den Transformator werden zwei hochpermeable und weichmagnetische Kernmaterialien aus Mangan-Zink in U-Form mit einer relativen Permeabilität von $\mu_r = 2500$ gewählt. Die Ferrite verfügen über ein sehr lineares Verhalten. Die effektive Länge des Kerns l_e beträgt 308 mm, die effektive Querschnittsfläche A_e beträgt 645 mm^2 , und die gesamte Sättigungsflussdichte beträgt $B_{\text{sat}} = 470 \text{ mT}$. Mit der gegebenen Sättigungsflussdichte können entsprechend Gleichung 7.9 maximale Ströme von 46,1 A ausgekoppelt werden.

$$I_{\text{sat}} = \frac{B_{\text{sat}} l_e}{\mu_0 \mu_r} = \frac{470 \text{ mT} 308 \text{ mm}}{4\pi 10^{-7} \text{ Vs A}^{-1} \text{ m}^{-1}} = 46,1 \text{ A} \quad (7.9)$$

Für die sekundäre Seite wurden fünf Windungen und eine Bürde von 50Ω gewählt. Hieraus ergibt sich eine Eigeninduktivität von $164 \mu\text{H}$. Die untere Grenzfrequenz kann mit Gleichung 7.10 zu 48,5 kHz bestimmt werden.

$$f_g = \frac{R_{\text{Bürde}}}{2\pi L_{\text{HFCT}}} = \frac{50 \Omega}{2\pi 164 \mu\text{H}} = 48,5 \text{ kHz} \quad (7.10)$$

7.3.2. Signalkonditionierung

Für den Hochfrequenzstrompfad sollen alle Signale unterhalb von 500 kHz herausgefiltert werden, um Störbeeinflussungen im unteren Frequenzbereich zu minimieren. Weiterhin sollen Frequenzanteile größer als 15 MHz unterdrückt werden. Darüber hinaus muss die Ausgangsspannung verringert werden, denn der AD-Wandler ist nur in der Lage, Signale von max. $\pm 1\text{ V}$ zu erfassen. Die obere Schwelle des Messbereichs soll Impulse mit einer Höhe von bis zu $\pm 20\text{ A}$ darstellen können, weswegen eine Dämpfung von 40 dB gewählt wird. Die eigentliche Schwierigkeit bei der Konstruktion des Bandpasses liegt in der geringen Störbeeinflussung durch kapazitives Übersprechen zwischen dem Ein- und dem Ausgang des Vierpols. Je zwei 20 dB-Dämpfungsglieder und der Bandpass werden in separate Glieder unterteilt und in einem Bauteil zusammengeführt. Der Signallaufplan ist in Abbildung 7.12 zu sehen [Men 2014].

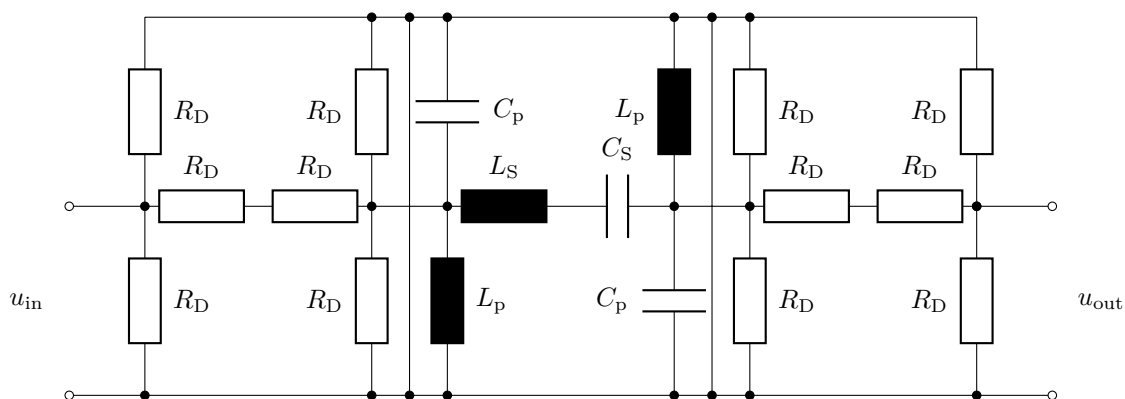


Abbildung 7.12.: Aufbau der projektierten Signalkonditionierung mit zwei Dämpfungsgliedern und einem Bandpass dritter Ordnung

Die entsprechenden Bauteilwerte sind in Tabelle B.2 zu finden.

7.3.3. Übertragungsverhalten

Die realen gemessenen Übertragungsverhalten sind in Abbildung 7.13 zu sehen. Mit Gleichung 7.11 kann die reale Sensitivität aus dem Frequenzgang ermittelt werden.

Sie ergibt sich zu $S_{\text{HFCT}} = 15,27 \text{ V A}^{-1}$. Zusammen mit dem Bandpass, welcher eine reale Dämpfung von $-40,3 \text{ dB}$ aufweist, ergibt sich eine Gesamtsensitivität für den Hochfrequenzpfad von $S_{\text{HFCT,BP,dB}} = 0,1476 \text{ V A}^{-1}$ und damit ein realer Messbereich von $\pm 6,78 \text{ A}$ bei einer Amplitudenauflösung von $0,827 \text{ mA Bit}^{-1}$.

$$S_{\text{HFCT}} = R_{\text{Bürde}} \cdot 10^{\frac{L_V}{20}} = 50 \Omega \cdot 10^{\frac{-10,3 \text{ dBV}}{20}} = S_{\text{HFCT}} = 15,27 \text{ V A}^{-1} \quad (7.11)$$

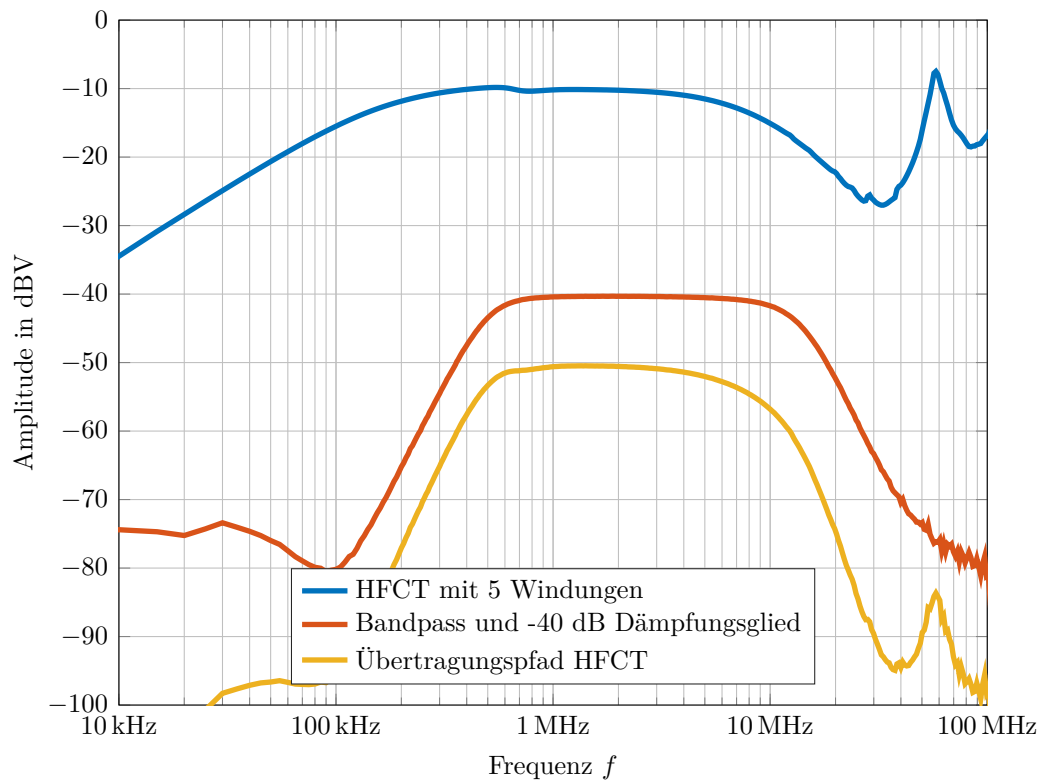


Abbildung 7.13.: Gemessenes Übertragungsverhalten des HFCT, des Bandpasses mit integriertem Dämpfungsglied und die Summe beider Glieder

7.3.4. Verifikation mit realen Gleitentladungen

Eine der Kernfragen in Bezug auf die Verlässlichkeit der angestrebten Untersuchungen ist die Belastbarkeit der hier ermittelten Vorentladungsdaten. Vor allem vor dem Hintergrund, dass diese zahlenmäßig nur in geringer Menge zur Verfügung stehen werden, sollten hier möglichst verlässliche Auskopplungen erzielt werden. Um dies

zu untersuchen, werden Voruntersuchungen mit realen Teilentladungsquellen vorgenommen.

Da die Entladungen an einer Fangstange in einem Bereich zwischen 1 nC bis 2000 nC erwartet werden, werden Entladungen an einer Gleitanordnung untersucht. Hierbei sind sehr hohe Ladungswerte zu erwarten. Die Entladungen sollen mit dem kommerziellen und kalibrierten System MPD 600 der Firma OMICRON verglichen werden. Gleitentladungen entstehen unter Wechselspannungsbeanspruchung in Bereichen, an denen es zu einer sehr hohen tangentialen Feldbeanspruchung kommt. Aus der Praxis kennt man solche Probleme bei Hochspannungsdurchführungen oder Kabelendverschlüssen. Eine modellhafte Anordnung ist die Toeplersche Gleitanordnung, bei der eine Elektrode auf ein Material mit einer hohen Permittivität und einer hohen Durchschlagfeldstärke aufgebracht wird. Ihr gegenüber befindet sich ein flächiges Erdpotential. Bei Gleitentladungen kommt es zur „Leitblitzbildung“. Der „Leitblitzkopf“ wird Gleitpol genannt. Die LPDMU soll parallel zum Messsystem MPD 600 Gleitentladungen messen. Die LPDMU wird zu diesem Zweck umprogrammiert, so dass der Kanal 0 eine Abtastrate von 65 MSs^{-1} besitzt. Für die Dauer einer Sekunde können nun kontinuierlich Vorentladungen erfasst werden. Kanal 1 wird mit einem optischen Eingang versehen, womit die Messeinrichtung über einen Lichtwellenleiter getriggert werden kann. Der Versuchsaufbau für die Vergleichsmessung ist in Abbildung 7.14 zu sehen.

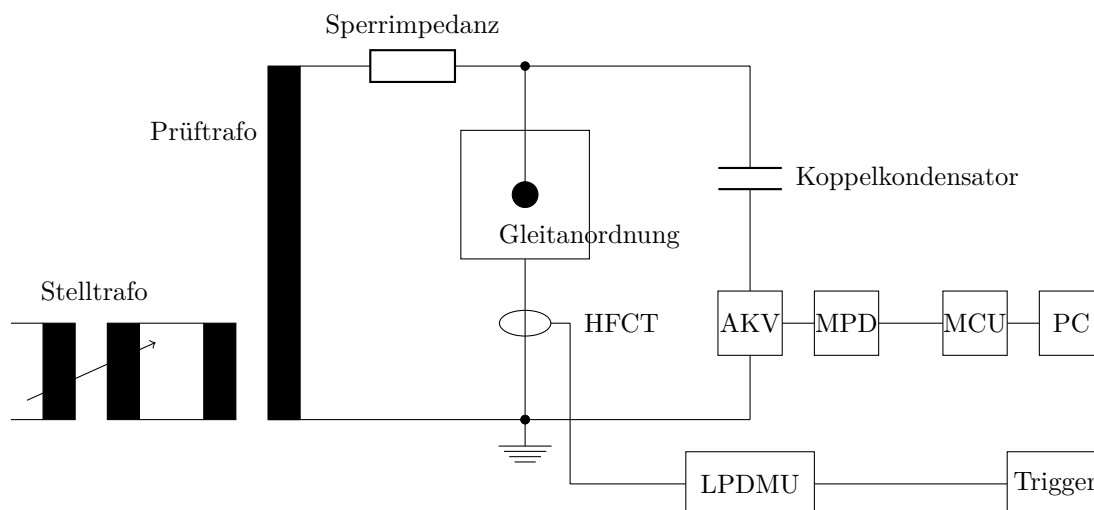


Abbildung 7.14.: Messung von Gleitentladungen mit der LPDMU und dem kommerziellen Teilentladungsmesssystem MPD 600 der Firma Omicron

Die LPDMU konnte nach einer ersten Auswertung 30.774 Impulse innerhalb einer Sekunde registrieren. Einen sehr kleinen Ausschnitt von 4 ms zeigt Abbildung 7.15.a. Zu erkennen sind hier 63 Einzelimpulse unterschiedlicher Amplitudenhöhen. Der höchste Impuls ist in Abbildung 7.15.b vergrößert dargestellt. Im Gegensatz zum Messsystem der Firma Omicron steht nun der komplette zeitliche Verlauf für die Auswertung zur Verfügung.

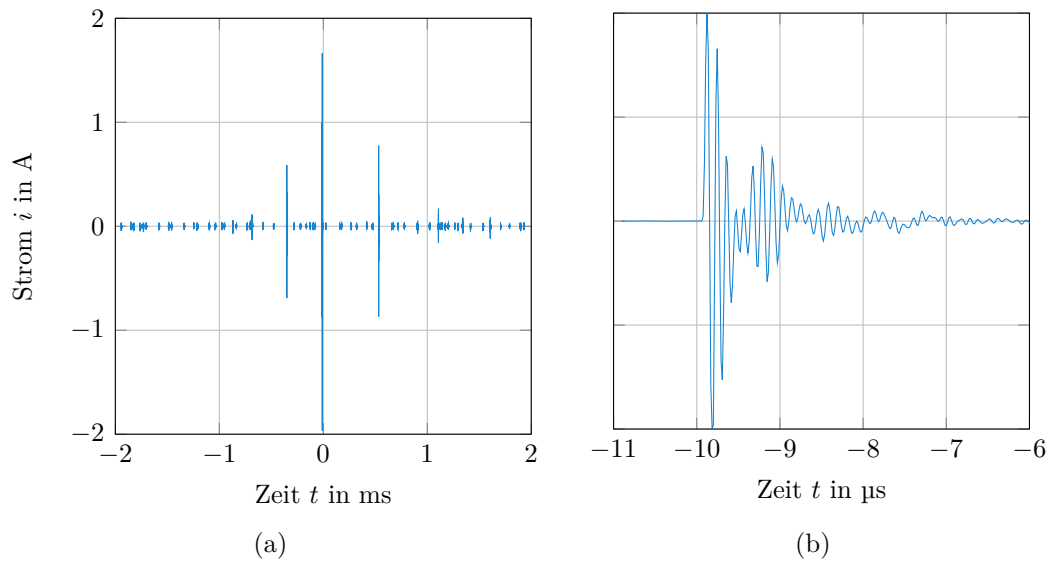


Abbildung 7.15.: Teilentladungsimpulse an einer Toeplerschen Gleitanordnung, die mit der LPDMU gemessen worden sind (a) 4 ms-Ausschnitt b) Einzelimpuls 5 μs

Für den Vergleich der Auskopplungsqualität beider Teilentladungsmesssysteme müssen nun in beiden Zweigen die Entladungen untersucht werden. Da es nicht möglich ist, beide synchron zu starten, werden die beiden Messsysteme nur ungefähr zeitgleich gestartet. Da das Teilentladungsmesssystem MPD 600 in der Lage ist, länger als nur eine Sekunde Daten zu erfassen, wird dieses zuerst gestartet und auch als letztes gestoppt. Die LPDMU erfasst eine Sekunde lang Daten. Im nächsten Schritt wird das Oszillogramm, welches durch die LPDMU aufgenommen wurde, hinsichtlich Teilentladungen untersucht. Um beide Messpfade im Nachhinein zu synchronisieren und zeitlich korrekt übereinander zu legen, wird ein Δt -Diagramm angefertigt, in dem von allen erkannten Impulsen des MPD-Messpfades die zeitlichen Differenzen zu jedem Impuls des LPDMU-Messpfades gebildet werden. Hierbei wurde sich auf die jeweils 10.000 höchsten Ladungspegel beschränkt, was jedoch zu einer Gesamt-

zahl von Zeitdifferenzen von 100.000.000 führt. Da die Impulse nur wenige Nanosekunden lang sind, muss auch die Zeitdifferenz sehr exakt untersucht werden. Ein Versatz von nur wenigen Nanosekunden führt zu fehlerhafter Korrelation. Ein Häufigkeitsdiagramm mit einer Histogrammbreite von 5 ns wird angefertigt. Einen kleinen Ausschnitt aus dem Δt -Diagramm zeigt Abbildung 7.16 [Spe 2015].

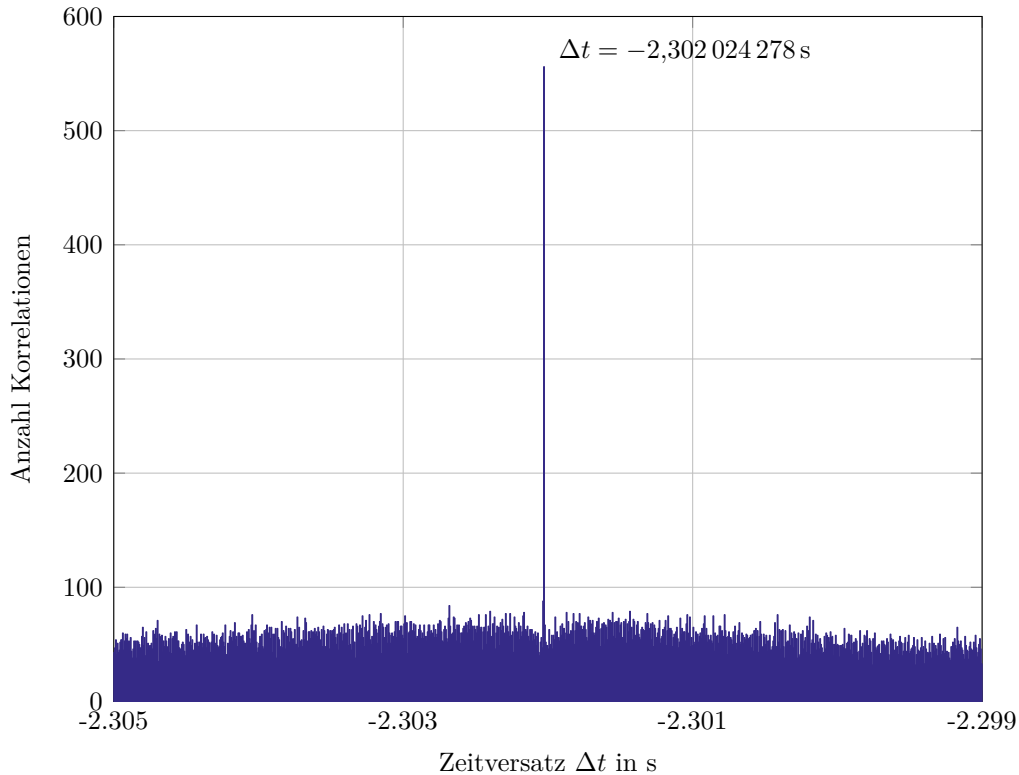


Abbildung 7.16.: Häufigkeitsverteilung des Auftretens eines Zeitversatzes zwischen Teilentladungspaaren, gemessen mit zwei unsynchronisierten Messsystemen

Es lässt sich ein signifikanter Versatz von $-2,302\,024\,278\text{ s}$ ermitteln. Mit diesem Zeitversatz lassen sich die aufgenommenen Datensätze synchronisieren und vergleichen. Das Omicron-System ist breitbandig auf eine Mittenfrequenz von 650 kHz einkalibriert. Die Ladungswerte aus dem Messzweig der LPDMU werden bei 3 MHz ausgekoppelt. Den Ausschnitt der Vergleichsmessung im Zeitbereich für einen Zeitraum von 100 ms zeigt Abbildung 7.17. Hierbei sind die ausgekoppelten Ladungswerte der Impulse beider Systeme in logarithmischer Darstellung als Absolutwert abgetragen. Um die Ladungsimpulse des Omicronsystems wurden in einem Zeitfenster von 1 μs der nächste Impuls gesucht. Nur Ladungspegel, zu denen eine zeitliche

Korrelation gefunden wurde, sind mit einem Kreuz markiert und überdies durch eine Falschfarbenlinie dem Ladungswert aus der LPDMU-Messung verbunden. Die Falschfarbe gibt Auskunft über den logarithmischen Abstand der Ladungsdifferenz beider Ladungswerte. Je heller die Farbe der Verbindung ist, desto ähnlicher sind sich die Auskopplungswerte. Man erkennt an dieser Darstellung weitere Dinge. Zum ersten gab es vereinzelte Fehlkorrelationen sehr intensiver Teilentladung (TE) die mit TE im Rauschband korreliert wurden. Zum zweiten besitzt das Omicron-System eine variable Eingangsverstärkung und damit ein wesentlich geringeres Rauschband in diesem Messbereich. Der Analog-Digital Converter (ADC) des Omicron-Systems kann sich also besser auf die Signale einstellen und besser auflösen. Das Rauschband der LPDMU liegt bei etwa 200 pC, was ein sehr guter Wert ist, wenn man bedenkt, auf welchen Messbereich das System ausgelegt ist.

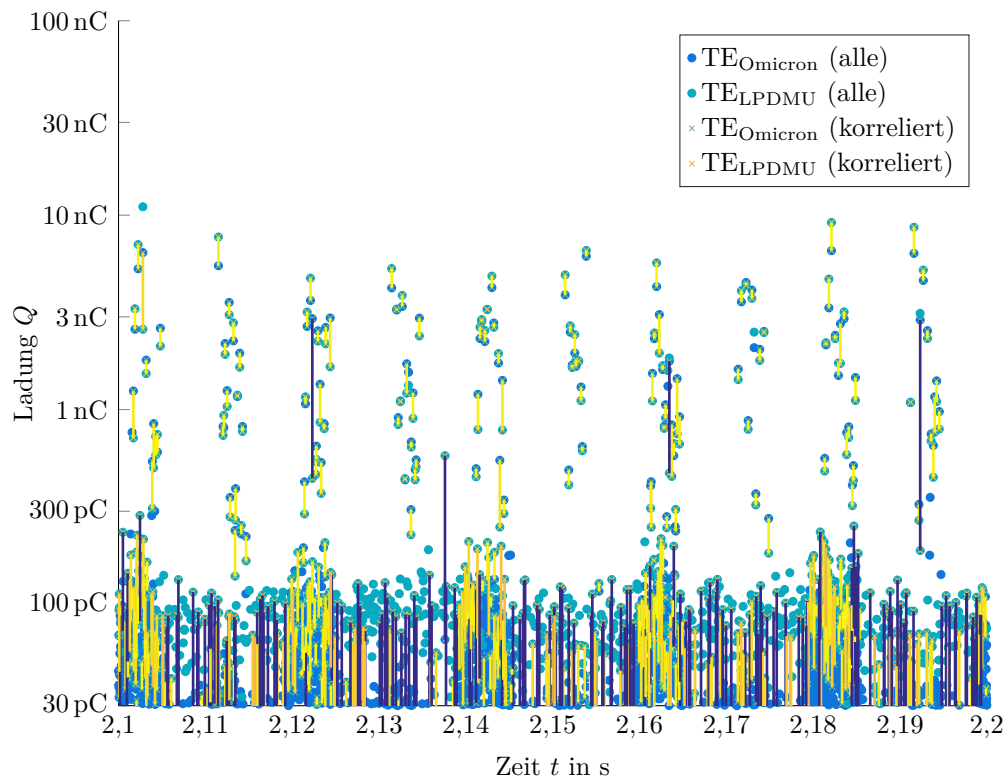


Abbildung 7.17.: Ausschnitt Teilentladungsmessereignisse gemessen mit dem Omicron-System und der LPDMU im Zeitbereich, mit eingefärbten Korrelationsabständen zu jedem Korrelationspaar

Ein großer Vorteil dieser Datenerfassung ist die Tatsache, dass die LPDMU einen

langen Zeitbereich auflöst und somit für jeden Impuls der zeitliche Verlauf und auch die Fast Fourier Transform (FFT) vorliegt. Auf diese Art können nachträglich Mittenfrequenz und Bandbreite geändert werden. Somit sind im Nachgang noch Optimierungen hinsichtlich der Störunterdrückung oder Impulsseparierung möglich. In Abbildung 7.18 ist ein Histogramm aller 30.774 Impulse, die während der einsekündigen Aufnahmedauer erfasst wurden, zu sehen.

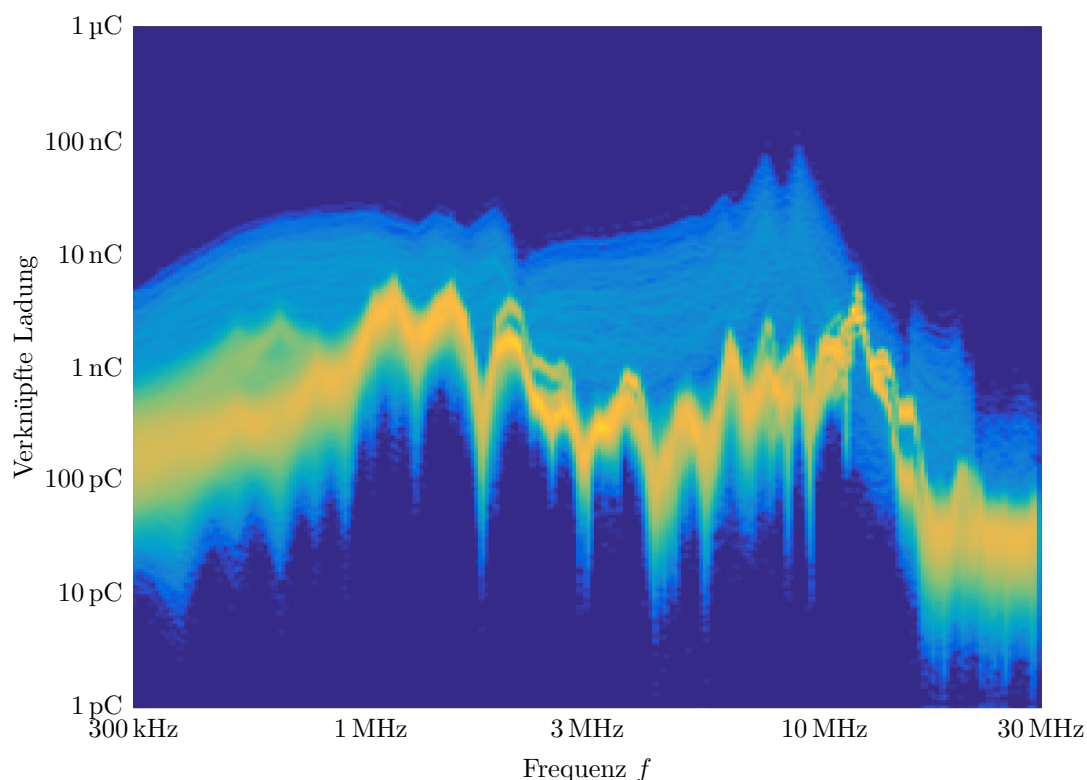


Abbildung 7.18.: Qualitatives zweidimensionales Histogramm aller Frequenzdichtespektren der Teilentladungsereignisse, gemessen mit der LPDMU

Amplitudendichten die in Impulsen häufiger vorkommen, sind heller. Das breite gelbe Band ist den Rauschimpulsen zuzuordnen. Die interessanten Impulse bilden einen dunkelblauen Bereich oberhalb dieses gelben Bandes ab. Man erkennt an der Abwesenheit von Häufungen, dass die Frequenzspektren nur nach oben und unten verschoben sind, also unterschiedliche Ladungshöhen darstellen. Die stärksten Impulse haben damit alle ein sehr ähnliches Frequenzspektrum. Man erkennt ebenfalls sehr gut den Hochpasscharakter bei 500 kHz, und man erkennt auch, dass die obere Grenzfrequenz unterhalb der eigentlichen Erfassungsknickfrequenz des Bandpasses

liegt. Dies kann damit zusammen hängen, dass die Impulse aufgrund ihrer hohen Ladung langsamere Ausgleichsvorgänge darstellen. Das Augenmerk in dieser Abbildung liegt in erster Linie auf den hohen Entladungen.

Vergleicht man die Ladungsinhalte aller Ladungspaare aus dem Omicron-System mit dem der LPDMU bei ihren jeweils einkalibrierten Mittenfrequenzen, so lässt sich ein sehr guter linearer Zusammenhang zwischen beiden Messsystemen erkennen.

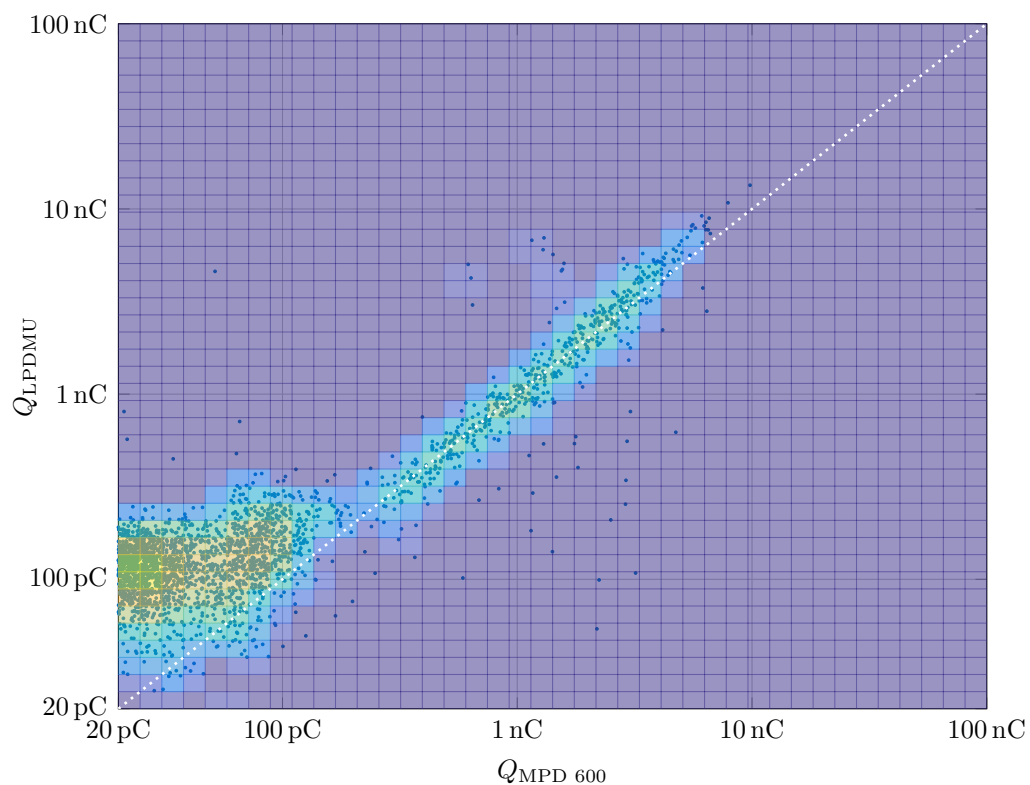


Abbildung 7.19.: Vergleich der korrelierten Ladungspaare gemessen mit dem Omicron-System bei einer Mittenfrequenz von 650 kHz (Referenz) und der LPDMU bei einer Mittenfrequenz von 3 MHz

7.4. Messdatenerfassung mit FPGA

Die Messdatenerfassung muss robust, leistungsfähig und kostengünstig sein. Sie muss idealerweise vollkommen deterministisch funktionieren. Übergeordnete Prozessstrukturen durch Betriebssysteme oder anderen Plattformen sind zu vermeiden. Für die kostengünstige Umsetzung wird eine Messdatenerfassung auf Grund-

lage eines Field Programmable Gate Array (FPGA)-Entwicklungsboards gewählt. Eingesetzt wird das Board DE2-115 der Firma Terasic mit einer AD-Wandler-Erweiterungskarte. Diese Datenerfassungseinheit bietet zwei separat abtastbare Kanäle mit einer Signalbandbreite von jeweils 500 MHz, einer Amplitudenauflösung von 14 Bit (Effective Number of Bits (ENOB) 11,9 Bit), einer zeitlichen Auflösung von bis zu 65 MS s^{-1} pro Kanal und einer Speichertiefe von 128 MByte (etwa 64 MS). Die Messdatenerfassungseinheit wird mit der Hardwarebeschreibungssprache Verilog programmiert. Durch die freie Programmierung eines FPGA lassen sich unterschiedliche parallele Prozessstrukturen mit unterschiedlichen Taktzyklen realisieren, was es ermöglicht, beide Kanäle mit unterschiedlichen zeitdiskreten Abständen abzutasten und zu verarbeiten. Die Erfassungseinheit speichert die Daten aus den AD-Wandlern kontinuierlich in einem Synchronous Dynamic Random Access Memory (SDRAM), der als Ringspeicher fungiert. Die Triggerung erfolgt über den Kanal 1, welcher den Hochstrom erfassen wird. Diejenigen Daten, die zeitlich vor und nach dem Triggerereignis liegen, werden vom Ringspeicher auf eine Speicherkarte übertragen. Anschließend arbeitet die Messeinrichtung weiter. Die Erfassungseinheit ist über ein General Packet Radio Service (GPRS)-Modul administrierbar.

7.4.1. Allgemeine Programmierung in Verilog und VHDL

Die Programmierung des FPGA's erfolgt in Verilog und Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language (VHDL). Hierbei ist eine voll funktionsfähige Datenerfassung entstanden. Die Programmierung hat sich auf die elementare Grundfunktionalität beschränkt. Es werden beide AD-Wandler, der SDRAM (128 MByte), der Static Random Access Memory (SRAM) (2 MByte), der Secure Digital Memory Card (SDMC)-Kartenleser sowie eine Radio Sector 232 (serielle Schnittstelle) (RS232)-Schnittstelle, an die das GPRS-Modul angeschlossen ist, angebunden.

Es wird ein NIOS II-Prozessor auf den FPGA programmiert (Speicheranbindung an SRAM), welcher letztlich die Ausgabedaten auf eine SDMC-Card schreibt. Das Konzept ist streng deterministisch auf dem FPGA implementiert. Die AD-Kanäle werden in zwei First In First Out (FIFO)'s übertragen, welche permanent in den SDRAM übertragen werden. Obwohl jeder AD-Wandler 14 Bit auflöst, werden aus Gründen der Einfachheit 16 Bit-Datenwörter im Speicher abgelegt und verarbeitet. Hierbei

werden die ersten zwei Bit jedes Datenworts zu „0“ gesetzt und für die Triggerung verwendet. Aus diesem Grund kann der SDRAM maximal 67.108.864 Datenworte abspeichern. Gleichzeitig wird jeder Wert des Hochstrompfads auf die Über- oder Unterschreitung eines definierten Triggerwertes überprüft. Wird der Trigger ausgelöst, dann werden weitere Daten entsprechend der Posttriggerlänge im SDRAM abgespeichert. Erst wenn beide Kanäle vollständig in den SDRAM übertragen wurden, erfolgt ein internes Triggersignal an die NIOS II-Prozessstruktur, welche nun die Daten auf die SDMC überträgt. Hierbei wird auch ein Global Positioning System (GPS)-Zeitstempel festgehalten, zu dem die Abspeicherung erfolgt. Die Zeitmarke macht es möglich, das Triggerereignis mit Blitzortungssystemen zu korrelieren. Die Programmierung wird geladen, sobald die Messeinrichtung eingeschaltet oder mit Strom versorgt wird. Die Daten in Tabelle B.3 sind jeder Zeit veränderbar. Weiterhin können die Samplegeschwindigkeiten vollkommen frei gewählt werden. Hierfür müssen allerdings die Phase Locked Loop (PLL)’s angepasst werden, was eine komplette Kompilierung auf dem Register Transfer Level (RTL) bedeutet. Die Abtastraten können vollkommen frei und unterschiedlich für beide Kanäle zwischen 1 MS s^{-1} und 65 MS s^{-1} gewählt werden.

7.4.2. Kommunikation

Um eine möglichst einfache und kostengünstige Kommunikation zu ermöglichen, wird ein Global System for Mobile Communications (GSM)GPRS-Modul über eine RS232-Schnittstelle mit dem Attention (AT)-Befehlssatz angesprochen. Die Kommunikation erfolgt über Short Message Service (SMS)-Kommandos. Hier können nun verschiedene Befehle versendet und empfangen werden, die Messeinrichtung antwortet dabei nur Befehlen, die von einer hinterlegten Rufnummer kommen. Die nachfolgenden Kommandos können genutzt werden, um Parameter neu zu programmieren oder andere Parameter oder Datensätze abzufragen. Die Befehle sind in Tabelle B.4 aufgeführt.

Die Messeinrichtung versendet darüber hinaus eine SMS, wenn sie sich initialisiert, beispielsweise wenn der Akku leer war oder ein Triggerereignis eintritt.

7.4.3. Datenauswertung

Die Messeinrichtung erfasst die Rohdaten und legt sie im internen Speicher ab. Die gesamte Datenauswertung wird im Nachgang aus den Rohdaten durchgeführt. Da beide Kanäle mit unterschiedlich großen Ringspeichern ausgerüstet sind, die Abtastraten unterschiedlich sind und der Triggerzeitpunkt nicht bekannt ist, müssen die Kanäle einzeln ausgelesen, nachbearbeitet und auf den gemeinsamen Nullpunkt synchronisiert werden. Der Ablauf ist im folgenden kurz dargestellt.

1. Einlesen der 16 Bit als dezimale Werte.
2. Alle Datenpunkte, die größer als 16384 sind, also diejenigen Datenworte, bei denen das erste Bit Most Significant Bit (MSB) gesetzt ist, wird der Wert 32768 abgezogen, da sie nach dem Triggerereignis entstanden sind.
3. Alle Datenpunkte, die kleiner als 16384 sind, also diejenigen Datenworte, bei denen das erste Bit nicht gesetzt ist, sind vor dem Triggerereignis entstanden und werden direkt übernommen.
4. Im nächsten Schritt werden die Datenworte umsortiert, sodass beim Sprung vom MSB von 1 auf 0 die Messung beginnt und ihren Triggerzeitpunkt beim Sprung von 0 auf 1 hat.
5. Im Anschluss wird ein Zeitvektor entsprechend der Abtastrate und dem Triggerernullpunkt erzeugt.
6. Nun werden alle 14 Bit-Werte in Spannungen und in der Folge in die Stromwerte der beiden Kanäle übersetzt und stehen einer weiteren Auswertung zur Verfügung.

7.5. EMV-Schirmkonzept

Klassischerweise kann es zu galvanischer, kapazitiver, induktiver und Strahlungskopplung kommen. Da die Messeinrichtung potentialfrei betrieben wird, kann es zu keinen galvanischen Kopplungen aus dem Netz oder durch Erdpotentialanhebungen kommen. Eine Strahlungskopplung im Nahbereich ist ebenfalls auszuschließen.

Vor und während eines Blitzeinschlages kommt es zu hohen elektrischen Feldstärken, welche kapazitiv als Gleichtaktstörer in die Messeinrichtung einkoppeln können. Weiterhin kommt es zu starken magnetischen Feldern, wenn der Hauptblitz und vor allem Folgeblitze abgeleitet werden. Diese Feldstärken sind in erster Linie eine Gefahr für die empfindliche Elektronik und können zudem die Messergebnisse verfälschen [Alt 2016].

7.5.1. Abschirmung gegen elektrische Felder

Um das Messsystem vor kapazitiven Einkopplungen zu schützen, wird ein 35 cm langer Aluminiumzylinder mit einem Durchmesser von 20 cm genutzt, welcher die Messeinrichtung vollständig umschließt. Die Wandstärke beträgt 10 mm. Die potentialfrei betriebene Messeinrichtung stellt also ein Potential dar, in dessen Inneren im Idealfall keine Felder auftreten können. Lediglich auf den flexiblen, doppelt geschirmten Leitungen der beiden Signalaufnehmer sind Einkopplungen möglich. Um das Eindringen von Gleichtaktstörern zu vermeiden, werden BALUNe eingesetzt. Sie nutzen die Eigenschaft des Stromes aus, ein richtungsabhängiges Magnetfeld aufzubauen. Die Signalleitung wird in Hin- und Rückleiter getrennt, jedoch gleichsinnig um einen Ferrit gewickelt. In diesem Fall wird kein Mangan-Zink-Ferrit, sondern ein Nickel-Zink-Ferrit eingesetzt, da er eine geringere Leitfähigkeit besitzt und sich daher nur geringe parasitäre Wirbelströme im gesinterten Material ausbilden können. Hierbei neutralisieren sich die Durchflutungen der gegensinnig fließenden Nutzsignale, und der BALUN bleibt wirkungslos für die Nutzsignale. Für gleichsinnige Ströme stellen die Wicklungen jedoch Drosseln dar, an denen die Störspannung abfällt. Die für die Bandsperre interessante untere Grenzfrequenz wird durch die Induktivität der aufgewickelten Leitung und den Wellenwiderstand gebildet. Die obere Grenzfrequenz bildet sich durch das kapazitive Übersprechen und den Verlust der Permeabilität des Kerns bei zu hohen Frequenzen. Zu sehen ist dieses Verhalten in Abbildung 7.20, bei dem ein FT-240-61 Kern mit unterschiedlichen Windungszahlen bewickelt wurde.

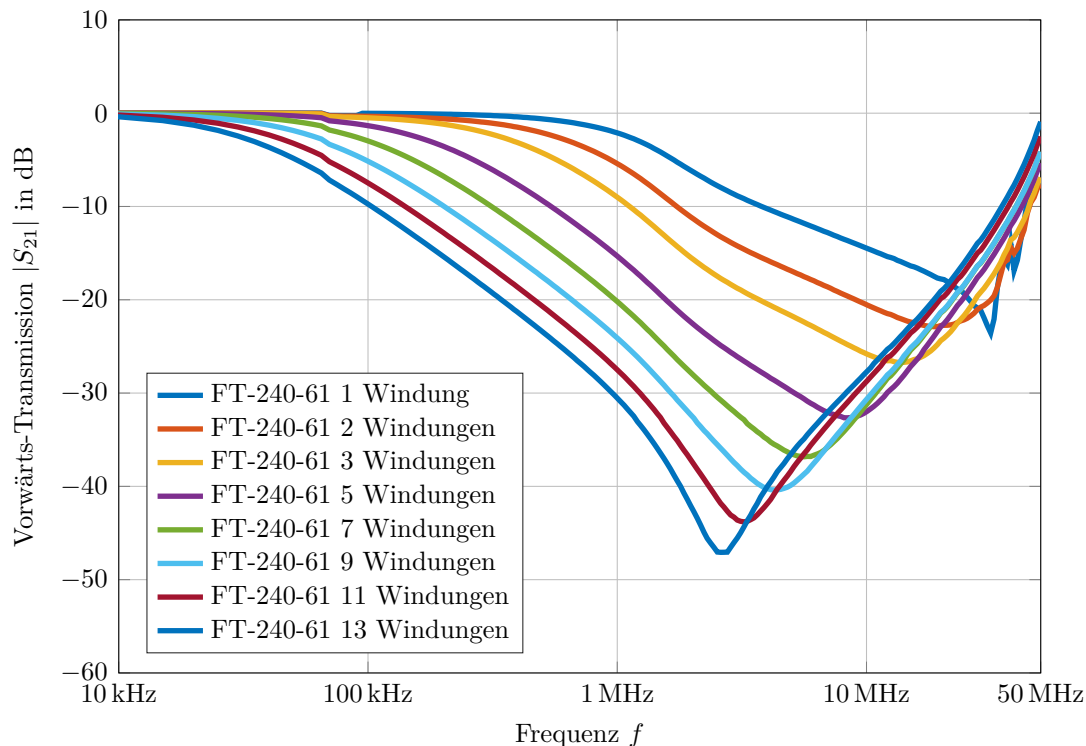


Abbildung 7.20.: Übertragungsverhalten eines bewickelten BALUNs mit verschiedenen Windungen bei Gleichtaktsignalen

Man erkennt, dass es im normalen Nutzbetrieb zu keiner Beeinträchtigung des Nutzsignals kommt. Man erkennt weiter im Falle eines Gleichtaktstörers, dass die Impedanz der Leitung zu höheren Frequenzen steigt und somit die Dämpfung zunimmt. Die untere Grenzfrequenz nimmt mit der Anzahl der Windungen ab. Für die Messeinrichtung wurde je ein BALUN für jeden Messzweig mit je 18 Windungen einer Doppelleitung mit einem Wellenwiderstand von 50Ω eingesetzt. Abbildung 7.21 zeigt den schematischen Aufbau des BALUNs.

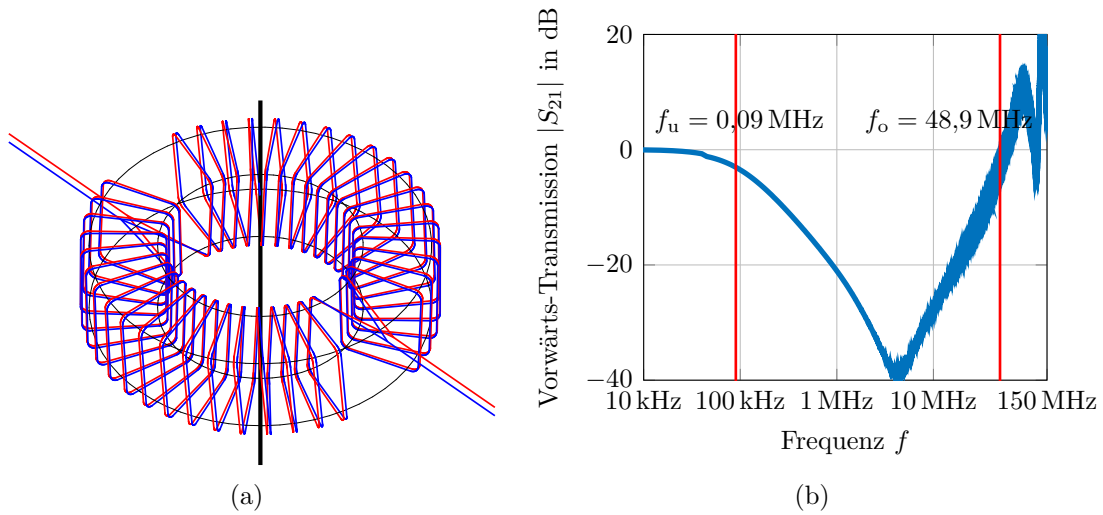


Abbildung 7.21.: a) Aufbau der in der Messeinrichtung eingesetzten BALUNE und b) Übertragungsverhalten bei Gleichtaktbeanspruchung

7.5.2. Abschirmung gegen magnetische Felder

Eine Abschirmung gegen magnetische Gleichfelder ist nicht nötig, da von ihnen keine Gefahr oder Beeinflussung für die Messeinrichtung ausgeht. Mit steigender Frequenz jedoch können in Schleifen induzierte Spannungen auftreten, die sich dem Messsignal überlagern oder sogar die empfindliche Elektronik beeinflussen oder schädigen können. Dabei steigt mit der Frequenz die mögliche Höhe der Überspannung. Magnetische Felder können auf zwei Arten geschirmt werden, durch Feldführung und durch Feldkompensation. Die Feldführung ist besonders bei magnetischen Gleichfeldern erfolgreich. Für magnetische Wechselfelder ist die Schirmung nach der Feldkompensation zielführender. Das magnetische Wechselfeld erzeugt in einem gut leitfähigen geschlossenem Schirm Wirbelströme, welche das Feld im Inneren des Schirmes reduzieren. Die Schirmwirkung hängt hierbei stark von der Dicke des Schirms und von der Leitfähigkeit des Schirmmaterials ab. Der Schirmbeiwert \underline{K} und die Schirmdämpfung für ein longitudinales Feld in einem Zylinder mit dem Radius r_z und der Dicke d_z können mit den Gleichungen 7.12 und 7.13 berechnet werden [Pei 1990].

$$\underline{K} = \frac{\mu_0}{\mu} \sqrt{j\omega\mu\kappa r_z} \quad (7.12)$$

$$\frac{H_i}{H_a} = \frac{1}{\cosh(k \cdot d_z) + \frac{1}{2} K \sinh(k \cdot d_z)} \quad (7.13)$$

Eine quadratische Leiterschleife mit Kantenlängen von 5 cm, welche senkrecht im Feld steht und dabei von einem Aluminiumzylinder mit den Maßen $r_z = 9$ cm und $d_z = 9$ cm umschlossen ist, erfährt bei einer angenommenen magnetischen Feldstärke von 100 kA m^{-1} eine maximale Überspannung von 10 mV. Abbildung 7.22 zeigt die projizierte Schirmwirkung.

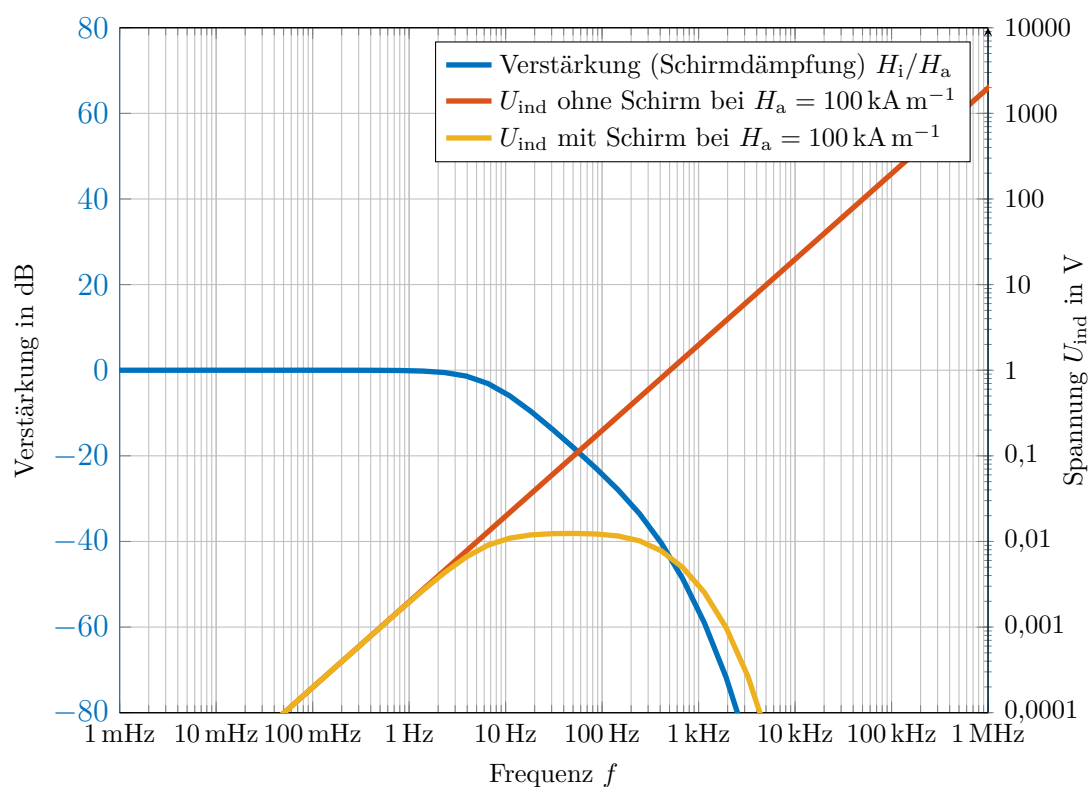


Abbildung 7.22.: Induzierte Überspannung an einer geschirmten quadratischen Leiterschleife bei einer angelegten äußeren Feldstärke von 100 kA m^{-1} in Abhängigkeit der Frequenz

7.6. Unterbrechungsfreie Stromversorgung

Für die Stromversorgung werden kommerzielle Produkte eingesetzt. Die Messeinrichtung verbraucht im Betrieb dauerhaft 7 W. Sie soll vor allem in den sonnenreichen

Sommermonaten aktiv sein, wenn in den Abendstunden Wärmegewitter einsetzen. Abbildung 7.23 zeigt die mittleren Sonnenscheindauern und die Zahl der Erdblitze in einem Umkreis von 20 km um Darmstadt in den Jahren 2006 bis 2015.

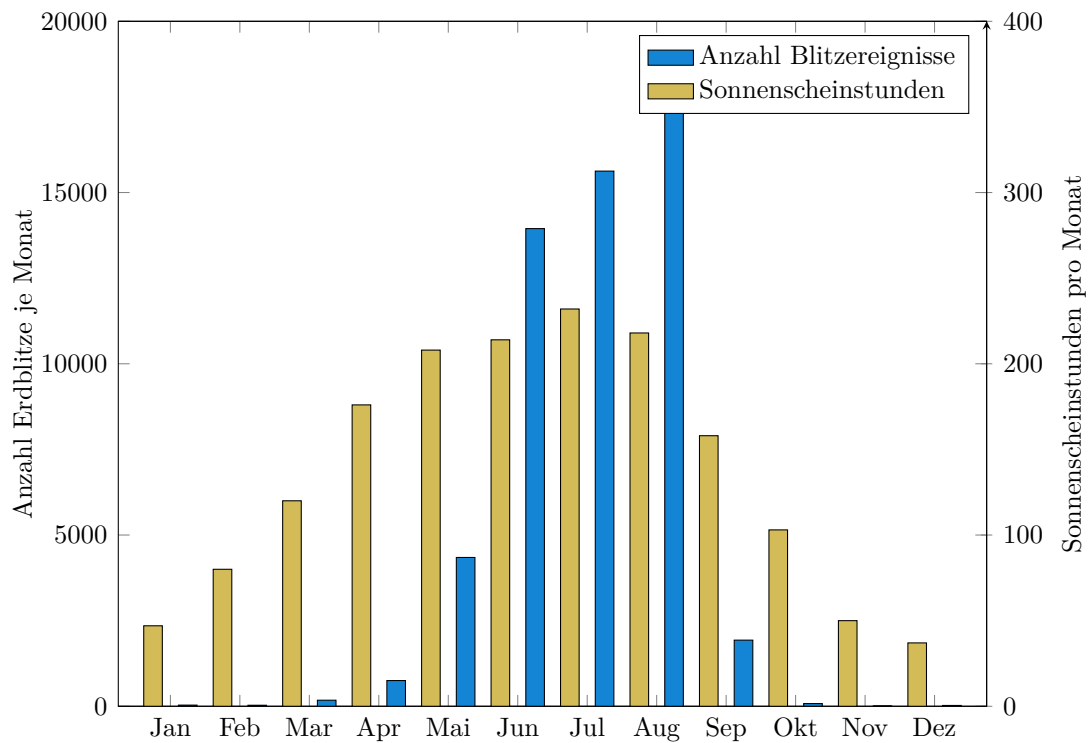


Abbildung 7.23.: Mittlere Sonnenscheindauer und Anzahl an Erdblitzen in den Kalendermonaten in 20 km Umkreis um Darmstadt in den Jahren 2006 bis 2015 aus frei zugänglichen Temperaturdaten des DWD und Blitzortungsdaten von BLIDS

Betrachtet man die Monate Mai bis September, dann beträgt die mittlere Sonnenscheindauer 206 h pro Monat. Für die Messeinrichtung wurde ein Solarpanel mit einer Ausgangsspitzenleistung von 100 W, ein Solarladeregler mit Pulse Width Modulation (PWM)-Regler und ein Bleigelakku mit 72 Ah projektiert [Sch2013]. Theoretisch kann der Akku bei voller Ausgangsleistung das Solarpanels in 9 h voll aufgeladen werden. Gleichzeitig ist er in der Lage, die Messeinrichtung 123 h kontinuierlich mit Strom zu versorgen, was etwa 5 Schlechtwettertagen ohne Sonnenschein entspricht.

7.7. Überspannungsschutz

Da die Messeinrichtung nicht mit einem Versorgungsnetz verbunden ist, dient der Überspannungsschutz lediglich dem Schutz der Messeinrichtung selber. Es existieren keine großen parasitären Schleifen, in die ein Störsignal einkoppeln könnte. Lediglich die Signalaufnehmer können Überspannungen an die Eingänge der AD-Wandler verschleppen und diese zerstören. Vor dem Eingang des Integrators sind daher antiparallele Dioden mit einer sehr geringen Sperrschichtkapazität geschaltet, die sich im äußersten Fall opfern und einen Kurzschluss bilden werden, wodurch dann auch der Überspannungsschutz gewährleistet ist.

Auch der Eingang des Hochfrequenzpfads ist von einem zweistufigen Staffelschutz bestehend aus einem Gasableiter, einer Induktivität und einem Varistor gegen Spannungen, die höher als 200 V sind, geschützt.

7.8. Umwelteinflüsse

Die äußeren Umwelteinflüsse sind im Wesentlichen die Temperatur, die Feuchte und Insekten. Um die Temperatur im Gehäuse bei hohen Temperaturen so gering wie möglich zu halten, ist die Messeinrichtung unterhalb des Solarpanels positioniert, wo keine direkte Strahlung auftritt. Alle Bauteile sollten in einem Temperaturbereich von -20°C bis 40°C ohne weiteres funktionieren. Lediglich der Akku wird eine geringere Kapazität bei niedrigeren Temperaturen aufweisen.

Entscheidender für die Funktion der Messeinrichtung ist die Vermeidung des Eindringens von Feuchtigkeit. Um diesem zu widerstehen, ist das Gehäuse vollkommen dicht und erfährt einen Druckausgleich über ein GORE Protective Vent. Um die Messeinrichtung abzudichten, werden an den beiden Deckelplatten je ein O-Ring mit einer zusätzlichen Nut eingebracht, sowie O-Ringe für die N-Durchführungen und eine IP-67 zertifizierte Durchführung für die Spannungsversorgung.

7.9. Erste Messungen im Hochspannungslabor bei Schaltstoßspannung

Als eine Art abschließende Verifikation zur Funktionsfähigkeit der LPDMU wurden einige Messungen in der Hochspannungshalle der TU Darmstadt durchgeführt. Als Aufbau diente eine Spitze-Platte-Anordnung, genauso, wie sie in Abbildung 5.1 angegeben ist. Die Spitze war hierbei eine Blitzfangstange mit einer Höhe von 9 m mit einem Radius von 1 cm. Die Schlagweite beträgt 2 m. Die Messaufnehmer der LPDMU wurden um den Rückleiter auf dem Erdboden angebracht.

Die Messungen haben ergeben, dass die Messeinrichtung auch bei sehr hohen elektrischen Feldänderungen funktionierte und Messdaten aufzeichnete [Gös 2016]. Eine solche Messung ist exemplarisch in Abbildung 7.24 zu sehen.

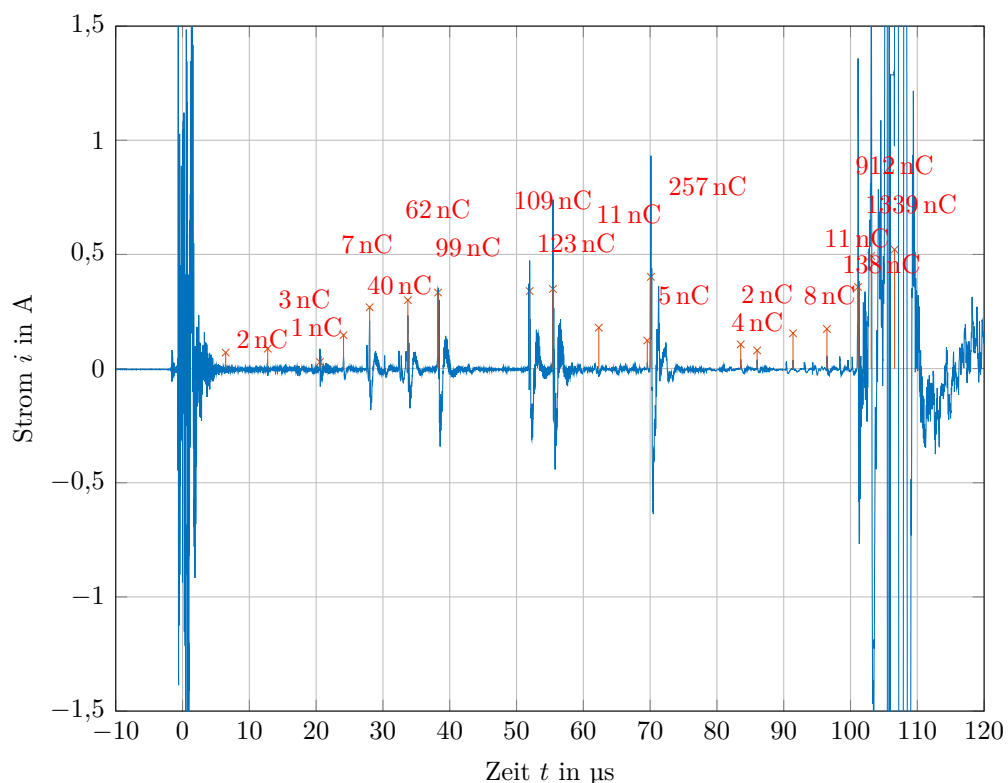


Abbildung 7.24.: Messung der hochfrequenten Vorentladungsströme in der Hochspannungshalle der TU Darmstadt mit einem genormten negativen Schaltstoßspannungsbeanspruchung; Zeit bis zum Durchschlag 106 μs

Zu erkennen sind zwei starke Einkopplungen, wenn die Funkenstrecken des Marx-Generators zünden und wenn der Durchschlag erfolgt. Beide Einkopplungen ließen sich nicht restlos unterdrücken. Man erkennt weiterhin sehr frühe Vorentladungen, die mit der Zeit größer und ladungsreicher werden. Eine Wiederholung mit weiteren Schaltstößen ermöglicht es, die Frequenzspektren der gemessenen Entladungen auszuwerten. Ähnlich wie bei der Gleitentladungsmessung kann ein entsprechendes Histogramm angefertigt werden und nachträglich die Ladungsermittlung an drei unterschiedlichen Mittenfrequenzen erfolgen. Die Möglichkeiten sind in Abbildung 7.25 angedeutet. Die aus der Teilentladungsmessung bekannten Werkzeuge können auch an einer Blitzfangstange angewendet werden. So zeigt das PRPD im zeitlichen Verlauf deutlich wiederkehrende Amplituden und Entladungsmuster. Mit Hilfe des 3CFRD konnten die Entladungen nach ihrem Ausbreitungsweg, also ihrem Frequenzspektrum getrennt werden. Es bilden sich unterschiedliche Cluster, die unterschiedlichen Entstehungsmechanismen zugeordnet werden können.

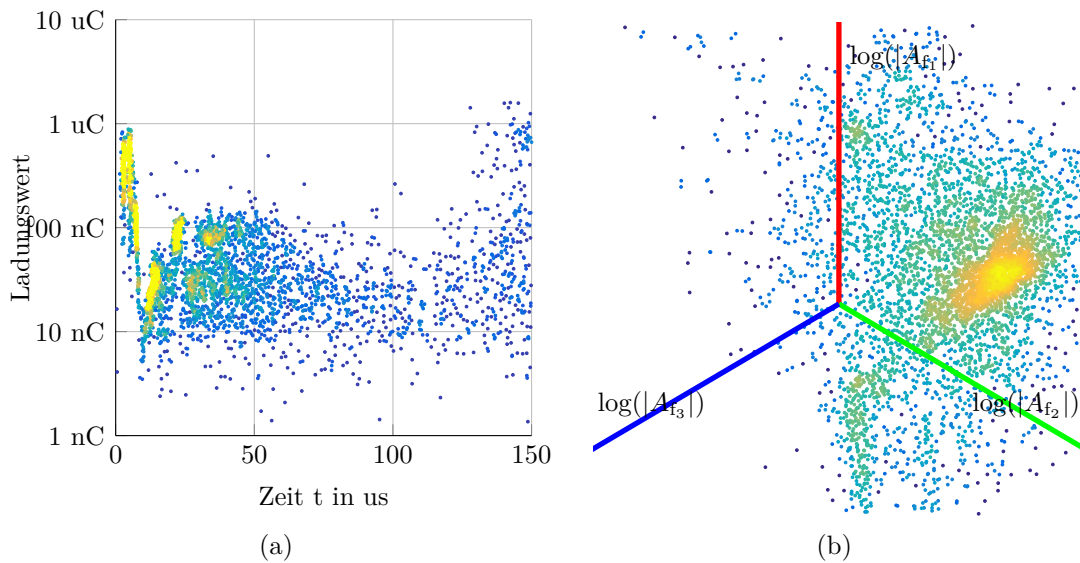


Abbildung 7.25.: Überlagerte Vorentladungsmessungen an einer Fangstange unter Schaltstoßspannungsbeanspruchung als a) PRPD-Darstellung und b) 3CFRD-Darstellung mit markanter Clusterbildung

7.10. Zusammenfassung

Gemessen an den Materialkosten ist eine sehr effektive Messeinrichtung entstanden. Abbildung B.9 zeigt einige der wichtigsten Komponenten. Die Messeinrichtung funktioniert vollkommen autark und kann mit einem Mobiltelefon aus der Ferne gewartet werden. Die erste Installation widersteht dabei seit beinahe zwei Jahren den Umweltbedingungen. Dabei ist die Messeinrichtung in der Lage, an einer Fangstange 2 Kanäle permanent mit den Parametern aus Tabelle 7.1 abzutasten. Ein bipolarer Trigger ermöglicht es, bei negativen oder positiven Blitzereignissen zu triggern. Eine erste Messperiode von knapp einem Jahr im Raum Darmstadt hat gezeigt, dass die Messeinrichtung unempfindlich gegen äußere Umwelteinflüsse ist. Die Messeinrichtung hat weiterhin in den Hochstoßstrom- und Hochspannungslabors der TU Darmstadt gezeigt, dass sie den elektrischen und magnetischen Feldern bei einem Blitzereignis widerstehen kann.

Tabelle 7.1.: Aufnahmeparameter der entwickelten Messeinrichtung

	Kanal 0 (HFCT)	Kanal 1 (Rogowskispule)
Bandbreite	500 kHz bis 15 MHz	0,2 mHz bis 2 MHz
Abtastrate	65 MS s ⁻¹	20 MS s ⁻¹
Auflösung	14 Bit	14 Bit
Least Significant Bit (LSB)	0,827 mA Bit ⁻¹	15,1 A Bit ⁻¹
Samples	22,75 MS	36 MS
Amplitudengrenzen	±6,78 A	±124 kA
Pre-Trigger-Zeit	300 ms	300 ms
Post-Trigger-Zeit	50 ms	1500 ms
Trigger-Level	ausgeschaltet	±1,24 kA

8. Evaluierung der Standortqualität

Das Kapitel soll klären, an welchen Standorten es besonders aussichtsreich ist, Fangstangen zu installieren, um eine möglichst große Anzahl von Abwärtsblitzen einzufangen. Zu diesem Zweck werden die allgemeinen Parameter ermittelt, die hierfür verantwortlich sind. In einem zweiten Schritt wird eine neuartige Simulationsmethodik zur Berechnung der Einfangwahrscheinlichkeiten an einem Gebäude adaptiert und weiter entwickelt. Die Simulationsmethodik wird im ersten Schritt eingesetzt, um allgemeine Aussagen über die Standortqualität zu erhalten, die in der Norm noch nicht abgebildet werden. Im weiteren Verlauf werden ganz konkrete Standorte auf ihre Qualität hin untersucht, Blitzereignisse einzufangen.

8.1. Allgemeine Randbedingungen zur Maximierung von Messdaten

Zur Maximierung der Messung von Abwärtsblitzen sind im wesentlichen die lokale Erdblitzdichte, die Höhe des Messortes und die umliegende Bebauung oder Vegetation entscheidend. Weitere globale Parameter wie die geografische Lage und die vorherrschende Klimazone sind Faktoren, die noch nicht genau genug erforscht sind. Zur ungefähren Risikoabschätzung gibt die Norm IEC 62305-3 vor, dass man die lokale Erdblitzdichte und die Einfangfläche eines Gebäudes ermitteln muss. Mit Gleichung 8.1 kann dann die ungefähre Anzahl von Blitzereignissen an einem Objekt bestimmt werden. Hierbei sind N_g die lokale Erdblitzdichte, A_d die Einfangfläche eines Objektes und C_d ein Korrekturfaktor, welcher die umliegende Bebauung und Vegetation berücksichtigt.

$$N_D = N_g \cdot C_d \cdot A_d \cdot 1 \cdot 10^{-6} \text{ km}^{-2} \quad (8.1)$$

8.1.1. Einfluss der Erdblitzdichte

Die Erdblitzdichte N_g ist ein Maß für die örtliche Auftretenshäufigkeit von Erdblitzten. Der Parameter gibt die Anzahl von Erdblitzten in einem Quadratkilometer und Jahr an. Er beeinflusst damit die Anzahl möglicher Blitzeinschläge linear. In Deutschland werden Erdblitzdichten von bis zu 4 Erdblitzten pro Quadratkilometer und Jahr erreicht, wobei die Erdblitzdichten im Norden geringer sind als im Süden. Die Erdblitzdichte kann näherungsweise mit dem keraunischen Pegel¹ T_k in Gleichung 8.2 bestimmt werden.

$$N_g = 0,04 \cdot T_k^{1,25} \quad (8.2)$$

Die Parameter werden jedoch recht ungenau abgebildet, und erst durch die immer weitere Verbreitung von Blitzortungssystemen ist er sinnvoll nutzbar.

Aus Blitzortungsdaten von ALDIS aus den Jahren 2006 bis 2015 lassen sich alle Blitzereignisse in und um Darmstadt innerhalb eines Radius von 20 km darstellen. Abbildung 8.1 zeigt alle negativen und positiven Erstblitze eines Erdblitzes, die in diesem Zeitraum aufgetreten sind. Jedes Ereignis besitzt einen Auswerterradius von 2 km, in dem die lokale Erdblitzdichte ermittelt und als Falschfarbeninformation dargestellt wird. Der Radius von 2 km ist wichtig, um bei 10 Jahren eine belastbare Anzahl von Blitzereignissen je Auswertepunkt zu berücksichtigen. Bei einer ungefähren Erdblitzdichte von 3 Ereignissen pro Jahr und Quadratkilometer sind auf einer Fläche von 12,56 km² in 10 Jahren etwa 376 Blitzereignisse je Auswertepunkt zu erwarten. An den Rändern des Auswertebereiches stehen nicht mehr in einem gesamten Auswertekreis Blitzereignisse zur Verfügung, weswegen hier ein Abfall der Erdblitzdichte zu erkennen ist. Man erkennt nun starke lokale Unterschiede in der Erdblitzdichte. Im südlichen und westlichen Bereich scheint es eine höhere Gewitterhäufigkeit zu geben. Hier liegt die Rhein-Main-Ebene die sich vor allem im Sommer gut aufheizt. Besonders das stark bebaute Darmstadt selbst scheint eine geringere Erdblitzdichte aufzuweisen. Betrachtet man die Evolution über die Jahre hinweg, so wird man jedoch auch feststellen, dass die Erdblitzdichte stark mit der jährlichen Gewitterhäufigkeit verknüpft ist. Die Zugrichtungen der Gewitter sind nicht jedes Jahr dieselben, weswegen sich hier starke Streuungen ergeben. Die Beschreibung der Erdblitzdichte kann daher nur eine sehr grobe Abschätzung bleiben. Ist die Erd-

¹ Der keraunische Pegel gibt die Gewittertage pro Jahr an.

blitzdichte in einer Region nicht signifikant unterschiedlich, sind andere Faktoren ausschlaggebender. Kommt es zu einem Blitzereignis über einer baulichen Struktur, dann ist es wichtiger zu wissen, wo mit einem Einschlag zu rechnen ist.

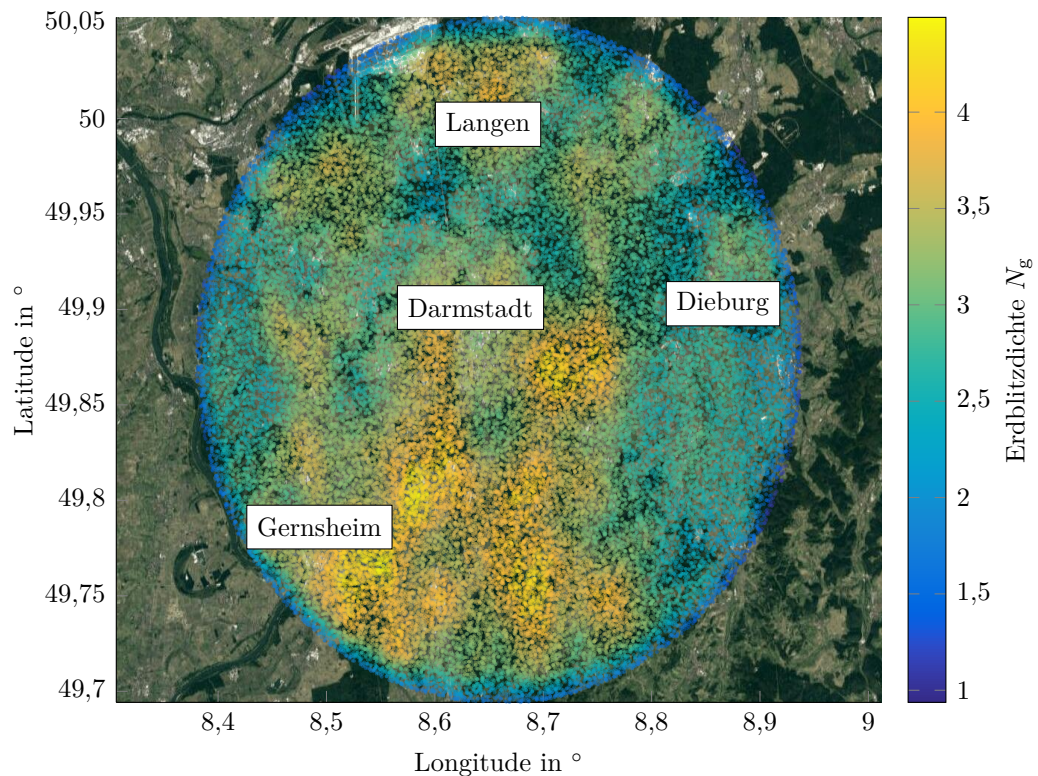


Abbildung 8.1.: Erdblitzdichte in und um Darmstadt in den Jahren 2006 bis 2015

8.1.2. Einfluss der Einfangfläche

Je höher ein Objekt ist, desto exponierter ist es und kann vor allem von Blitzen großer Ladung aus großer Entfernung erreicht werden. Auch kleinere Leitblitze können sich Objekten von der Seite aus nähern und in dieses einschlagen. Bei höheren Objekten ab einer Höhe von 60 m sind Seiteneinschläge möglich [IEC 62305-3]. Die Norm rät darüber hinaus, dass alle Teile eines Objektes ab einer Höhe von 120 m zu schützen sind. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Objekt getroffen wird, nimmt also mit der Höhe zu. Es existieren jedoch keine genauen Berechnungsvorschriften zur besseren Abschätzung der Gefahr. Zudem steigt mit der Gebäudehöhe die Gefahr, dass das Objekt selber zum Auslöser von Aufwärtsblitzen wird.

Die Einfangfläche soll ein Maß sein, welches die am Erdboden überstrichene Fläche repräsentiert die dem Blitz für einen Einschlag zur Verfügung steht. Die Einfangfläche A_d einer freistehenden baulichen Anlage auf ebenen Gelände berechnet sich überschlägig mit Gleichung 8.3, wobei W_O die Breite, L_O die Länge und H_O die Höhe eines Objektes mit rechteckiger Grundfläche ist.

$$A_d = L_O \cdot W_O + 6H_O \cdot (L_O + W_O) + 9\pi H_O^2 \quad (8.3)$$

8.1.3. Einfluss der umliegenden Bebauung und Vegetation

Die Umgebung entscheidet darüber, wie sehr die Einfangfläche beschnitten wird und somit, ob ein Blitz ein Objekt trifft oder nicht. Die Norm DIN EN 62305-2 unterscheidet mit Hilfe des Standortfaktors C_d grob vier Fälle. Diese Fälle sind in Tabelle 8.1 dargestellt.

Tabelle 8.1.: Standortfaktor C_d zur Anpassung der Einfangfläche von Objekten [DIN EN 62305-2]

Relative Lage	C_d
Objekt ist umgeben von höheren Objekten oder Bäumen	0,25
Objekt ist umgeben von Objekten oder Bäumen mit gleicher oder niedrigerer Höhe	0,5
Freistehendes Objekt: keine weiteren Objekte in der Nähe	1
Freistehendes Objekt auf einer Bergspitze oder einer Kuppe	2

8.2. DEGM zur Überprüfung der Standorteignung

Für eine konservative Risikoabschätzung genügt die in der Norm dargestellte Berechnungsvorschrift. Möchte man jedoch genauere Werte berechnen, um entscheiden zu können, wo Blitzeinschläge zu erwarten sind und wo nicht, muss das Objekt genauer untersucht werden. Eine Möglichkeit, dies zu tun, bietet das Dynamische elektro-geometrische Modell (DEGM). Das Dynamische elektro-geometrische Modell (DEGM) wurde von Kern als numerische Berechnungsvorschrift entwickelt [KSM 2011]. Es setzt auf das bekannte Blitzkugelmodell auf und erweitert dieses. Das

Verfahren verknüpft den Blitzkugelradius und die damit einhergehenden Stromstärken mit der Auftretenswahrscheinlichkeit eines negativen und positiven Erstblitzes. Dabei orientiert sich das gesamte Verfahren an dem in der Norm ([IEC 62305-1]) hinterlegten elektro-geometrischen Modell (EGM) und nutzt die in der Norm verankerten Verteilungen des International Council on Large Electric Systems (CIGRÉ). Der Blitzkugelradius und die Stromstärke sind nach Gleichung 2.1 miteinander verknüpft, und die Auftretenswahrscheinlichkeit für negative und positive Erstblitze lässt sich durch Gleichung 8.4 und die Parameter aus Tabelle 8.2 beschreiben [IEC 62305-1].

$$f_i(I_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta I_p} \cdot e^{-\frac{\left(\ln \frac{M}{I_p}\right)^2}{2\beta^2}} \quad (8.4)$$

Tabelle 8.2.: Parameter nach DIN EN 62305 zur Berechnung der Auftretenswahrscheinlichkeit neg. und pos. Erstblitze [DIN EN 62305-1]

	Median M	log. Standardabweichung β
neg. Abwärtsblitz < 20 kA	$M_1 = 61,1 \text{ kA}$	$\beta_1 = 1,33$
neg. Abwärtsblitz > 20 kA	$M_2 = 33,3 \text{ kA}$	$\beta_2 = 0,605$
pos. Abwärtsblitz	$M_3 = 33,9 \text{ kA}$	$\beta_3 = 1,21$

Mit diesen Parametern ergeben sich die in der Norm verankerten kumulierten Häufigkeitsverteilungen für negative und positive Erstblitze, aus denen sich die Eingangswahrscheinlichkeiten der vier Blitzschutzklassen ableiten. Dargestellt sind diese in Abbildung 8.2. Zusätzlich ist eine gemischte dritte Kurve zu sehen, welche sich aus den Kurven für negative (90 %) und positive (10 %) Erstblitze zusammensetzt und die im DEGM benutzt wird, um die Wahrscheinlichkeit für ein Blitzereignis zu berechnen. Als Besonderheit ist das Diagramm nicht auf den Stromscheitelwert, sondern logarithmisch auf die Enddurchschlagstrecke bezogen. Die sich hieraus ergebenden Stromscheitelwerte sind in einer zweiten Abzisse abgetragen. Hierbei ist zu beachten, dass die logarithmische Skala nicht mehr gilt, denn der Stromscheitel und die Enddurchschlagstrecke sind nicht linear miteinander verknüpft. Bemerkenswert ist weiterhin, dass die CIGRÉ-Verteilung eine Unstetigkeit bei 20 kA besitzt. Diese Unstetigkeit ist der Ursache geschuldet, dass man der tatsächlichen Verteilung negativer Erstblitze möglichst genau folgen möchte. Die Natur hingegen kennt in der Regel nur stetige Verläufe, weswegen es beispielsweise in der Verteilung des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) keine Unstetigkeit gibt [Coo 2009].

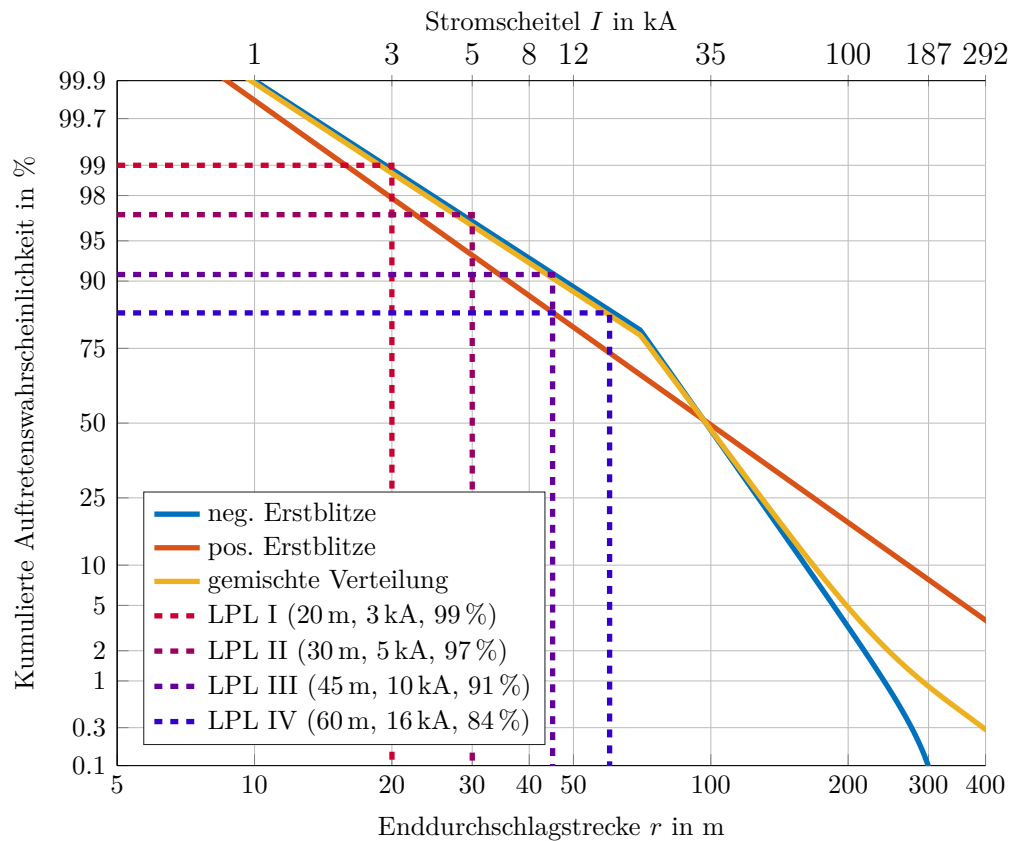


Abbildung 8.2.: Kumulierte Häufigkeit nach CIGRÉ für negative (blau), positive (rot) und $0,9 \cdot \text{neg.} + 0,1 \cdot \text{pos.}$ (gelb) Erstblitze über der Enddurchschlagstrecke (logarithmisch) und dem Stromscheitelwert (verknüpft über Gleichung 2.1) mit Unstetigkeit bei $I_p = 20 \text{ kA}$ bzw. $r = 70,1 \text{ m}$

Die kumulierte Häufigkeitsverteilung gibt an, wie viel Prozent aller Stromscheitel größer sind als ein projektierter Stromscheitelwert, beziehungsweise deren Enddurchschlagstrecke. Aus dem Bereich der Dimensionierung von Erdseilen an Freileitungen werden mit dem elektro-geometrischen Modell (EGM) auf ähnliche Weise die Wahrscheinlichkeiten für Schirmfehler oder rückwärtige Überschläge berechnet [WG3 1991]. Man nimmt hier jedoch auch an, dass Leitblitze sich der Erde nur senkrecht nähern können und Stromscheitel nicht kleiner als 3 kA werden können. Die Normen und Empfehlungen weichen teilweise stark voneinander ab.

Das neue DEGM-Verfahren untersucht dreidimensionale, komplexe Geometrien auf eine ganz ähnliche Art und Weise. Ein solches Verfahren ist also nicht wirklich neu. Es gab in diesem Zusammenhang in den 1970er Jahren sehr ähnliche Ansätze von

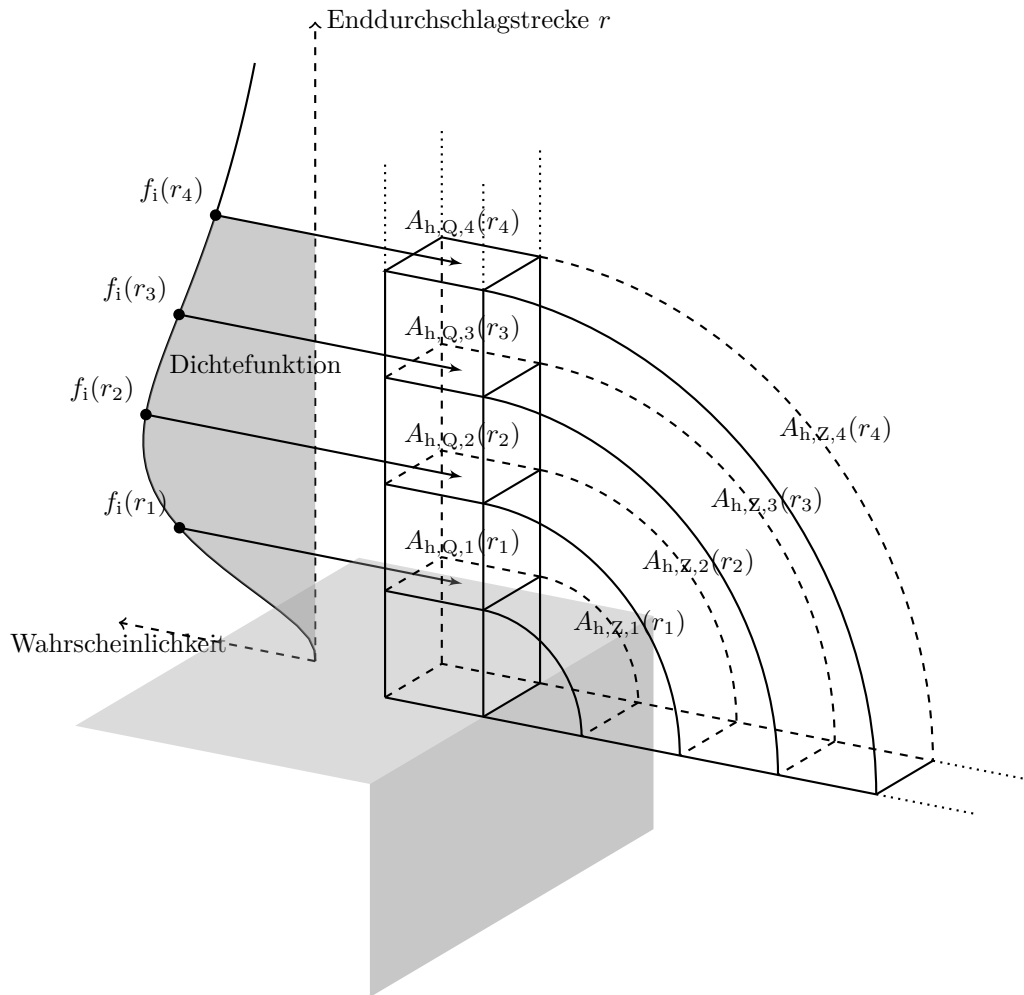
Horvath [Hor 1967], [Hor 1989], [Hor 2010]. Hierbei wurden jedoch lediglich analytische Überlegungen an rotationssymmetrischen Gebäuden oder an zweidimensionalen Strukturen angestellt, die mit eigenen Parametern untersucht wurden. Das neue von Kern vorgeschlagene, numerische DEGM-Verfahren lässt es zu, sehr komplexe Strukturen zu untersuchen.

8.2.1. Allgemeines Verfahren

Im Allgemeinen werden beim DEGM für ein Objekt oder einen Teil eines Objektes diejenigen Hüllflächen $A_h(r)$ ermittelt, die sich in einem äquidistanten Abstand zu dem jeweiligen Objekt befinden, die also die Mittelpunkte aller Blitzkugeln eines Radius beinhalten. Die Hüllflächen werden mit der Auftretenswahrscheinlichkeit von negativen und positiven Blitzstromscheiteln gewichtet. Hierbei wird eine kombinierte Wahrscheinlichkeit aus den beiden Dichteverteilungen für negative und positive Abwärtsblitze verwendet, wobei das Auftreten eines negativen Abwärtsblitzes mit 90 % und das eines positiven Abwärtsblitzes mit 10 % gewichtet wird. Im Anschluss werden die gewichteten Flächen aufintegriert und ergeben die Einfangfläche $A_{d,DEGM}$. Das Ergebnis ist dann eine Einfangfläche für ein Objekt oder einen Teil eines Objektes. Abbildung 8.3 soll qualitativ beschreiben, wie sich diese Hüllflächen ergeben und wie man von ihnen auf die Einfangfläche schließt.

Man erkennt die Kante eines Flachdaches, welches keinerlei konkurrierende Objekte in näherer Umgebung besitzt. Betrachtet wird zuerst eine quadratische Fläche auf dem Flachdach. Blitzkugeln erreichen diese Fläche lediglich aus einem Bereich vertikal über der Fläche. Gibt es keine konkurrierenden Objekte, an denen die Blitzkugeln anstoßen können, so können Blitzkugeln jeder Größe diese Fläche berühren, womit alle möglichen Enddurchschlagstrecken auf der Grundfläche möglich sind. Betrachtet man die Fläche mit einer Größe von 1 m^2 , so sind alle Flächen ($A_{h,n}(r_n)$), ebenfalls 1 m^2 groß. Jede einzelne Fläche wird nun mit der entsprechenden Wahrscheinlichkeit aus der Dichtefunktion gewichtet. Mathematisch drückt dies die Gleichung 8.5 aus. Da die Dichtefunktion in der Norm nur für den Blitzstromscheitel I_p und nicht für die Enddurchschlagstrecke r beschrieben ist, muss diese erst hergeleitet werden. Die Herleitung befindet sich im Anhang D.1.

$$A_{d,DEGM} = \int_0^{r_{\max}} f_i(r) A_h(r) dr \quad (8.5)$$



werden. Beispielhaft wird mit einer Kantenlänge von 1 m gerechnet.

$$A_{h,Z}(r) = 1 \text{ m} \cdot \frac{\pi}{2} r \quad (8.6)$$

Zwar nimmt die Hüllfläche mit größeren Enddurchschlagstrecken linear zu, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Abwärtsblitzen, die solche Enddurchschlagstrecken ermöglichen, wird jedoch immer geringer. Das wird in Abbildung 8.4 deutlich, wo die nicht kumulierten Dichtefunktionen für positive und negative Erstblitze sowie die gemischte Verteilung aus negativen und positiven Erstblitzen dargestellt ist. Hierbei fällt vor allem die Unstetigkeit aus der kumulierten Häufigkeitsverteilung auf. Man erkennt gut, dass sich der Wert für die Einfangfläche $A_{d,Z}$ einem asymptotischen Endwert nähert. Mit der Formel D.2 lässt sich die kumulierte Einfangfläche exakt berechnen. Kern nutzt in seinen Simulationen stets 300 m als maximalen Blitzkugelradius. Nimmt man maximale Blitzkugelradien von 300 m an, was einem Stromscheitelwert von etwa 187 kA entspricht, dann beträgt die Einfangfläche $A_{d,Z,300 \text{ m}} = 160,58 \text{ m}^2$. Der exakte analytische Endwert mit unendlich großen Blitzkugelradien beträgt $A_{d,Z,\text{analytisch}} = 167,28 \text{ m}^2$. Die Abweichung beträgt 4 %. Berechnet man die Einfangfläche nach einer Integrationsgrenze von 1000 m so lässt sich eine Fangfläche $A_{d,Z,1000 \text{ m}} = 166,95 \text{ m}^2$ berechnen. Dieser Wert weicht nur noch 0,2 % vom analytischen Wert ab, weswegen die eigene Simulation methodology in dieser Arbeit stets mit einem maximalen Blitzkugelradius von 1000 m arbeitet.

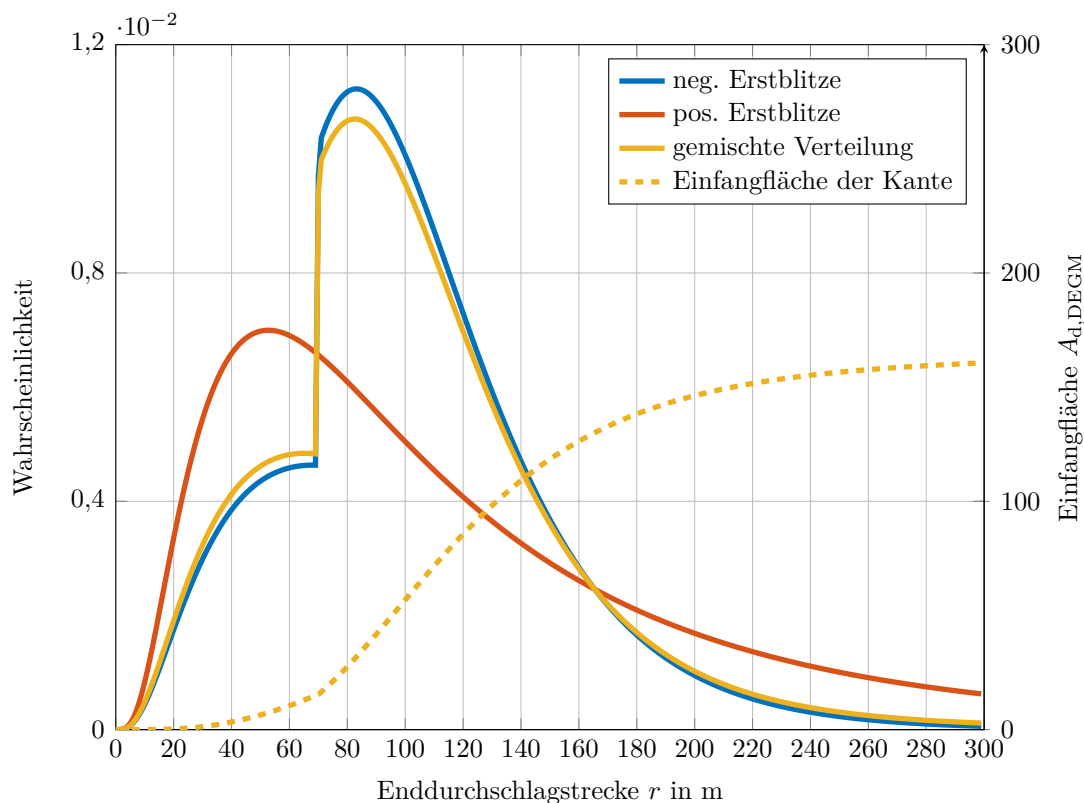


Abbildung 8.4.: Dichtefunktionen über die Auftretenswahrscheinlichkeit von negativen und positiven Abwärtsblitzen, sowie die Multiplikation mit der Hüllfläche und Ermittlung der Einfangfläche an einem Kantenelement

Dieses Beispiel illustriert überdies sehr deutlich die Erkenntnisse von Kern, dass vor allem exponierte Bereiche eines Gebäudes, wie Ecken und Kanten, höhere Einschlagswahrscheinlichkeiten als Flächen haben, da diese sehr viel größere Einfangflächen generieren.

Liegt die Einfangfläche als polynomialer Ausdruck vor, so kann mit Hilfe der Gleichung D.18 direkt die Einfangfläche berechnet werden. Mit dieser Hilfe können auch komplizierte Volumen an Ecken berechnet werden. Summiert man alle Einfangflächen, die zu einem Gebäude gehören, auf, so ergibt sich die Gesamteinfangfläche eines Objektes. Bezieht man die Teileinfangflächen jedes einzelnen Elements auf die Gesamteinfangfläche, lässt sich die prozentuale Wahrscheinlichkeit für einen Einschlag in dieses Element ermitteln.

8.2.2. Weiterentwicklung zur Anwendung von CAD-Daten

Um hoch komplexe und sehr unregelmäßige Strukturen zu berechnen, stößt der numerische Ansatz von Kern schnell an seine Grenzen, denn möchte man Würfel mit der Kantenlänge von 1 m auf einer quadratischen Grundfläche von 600 m und einer Höhe von 300 m untersuchen, so müssen bereits $599 \times 599 \times 299 = 107.281.499$ Würfel untersucht werden, was sehr aufwändig ist.

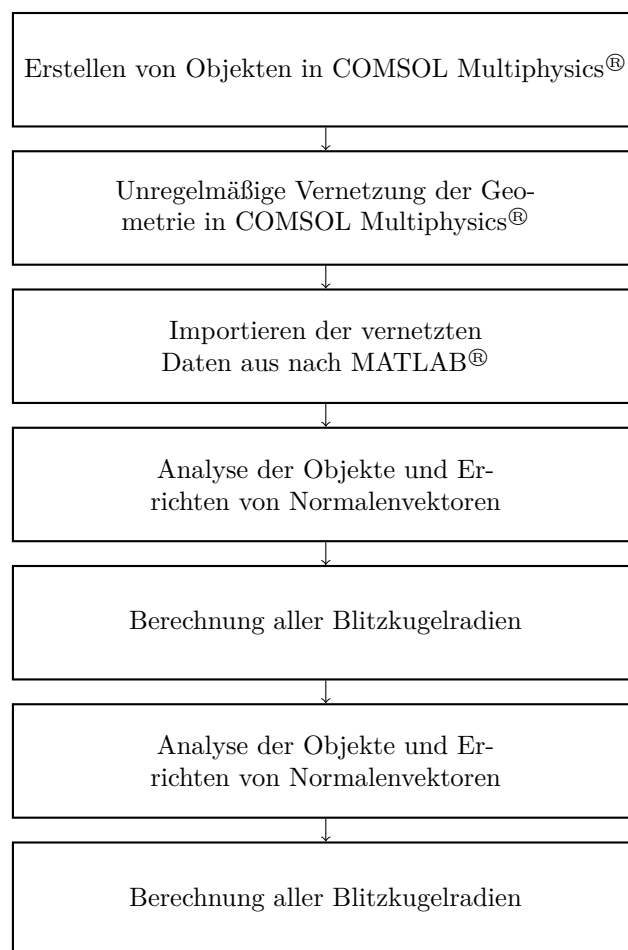


Abbildung 8.5.: Algorithmus zur Berechnung der Einfangwahrscheinlichkeit von Objekten in COMSOL Multiphysics® und MATLAB® auf Grundlage des DEGM

Um dieses Problem zu umgehen, wurde das Verfahren neu interpretiert und umgesetzt. Da es sich im Vorgehen vollkommen von dem numerischen Verfahren von

Kern unterscheidet, wird es als erweitertes dynamisches elektro-geometrisches Modell (eDEGM) bezeichnet. Das allgemeine Vorgehen des Berechnungsalgorithmus ist in Abbildung 8.5 dargestellt und im Folgenden näher erläutert.

Im ersten Schritt wird eine beliebige Geometrie mit der Software COMSOL Multiphysics® erstellt oder aber alternative Computer Aided Design (CAD)-Daten importiert. Im Anschluss wird die Oberfläche des Objektes mit einem unregelmäßigen Dreiecksnetz vernetzt. Hierbei ist es wichtig, dass die drei Punkte in einem Rechtssinn hinterlegt sind, damit Innen- und Außenseite des Dreiecks bekannt sind. Der Vorteil von Dreiecken gegenüber Vierecken liegt vor allem darin, dass Dreiecke immer eine definierte ebene Fläche aufspannen. Die Dreiecke können mit einer Delaunay-Triangulierung² auch runde Körper oder sehr feine Strukturen auflösen. Die fertige Vernetzung kann nun an MATLAB® übergeben werden.

Die Daten werden anschließend ausschließlich in MATLAB® verarbeitet. Von allen Dreiecksflächen wird der Schwerpunkt ermittelt und in ihm ein Normalenvektor mit der Länge Eins errichtet. Mit Hilfe dieser Normalenvektoren ist es nun auch möglich, herauszufinden, wie die Dreiecke zueinander orientiert sind. Befinden sich die Normalenvektoren von zwei angrenzenden Dreiecken nicht in einer linearen Abhängigkeit³, so liegt eine Kante vor. Ist der Winkel zwischen zwei Normalenvektoren positiv und nimmt einen Wert zwischen 0° bis 180° ein, so kann diese Kante von Blitzen erreicht werden. Um alle Richtungen aus denen eine Blitzkugel die Kante berühren kann zu berücksichtigen, müssen dort weitere Vektoren errichtet werden. Ganz ähnlich werden Ecken identifiziert und auch hier Vektoren errichtet. Am Beispiel eines Standardgebäudes sind die Vektoren in Abbildung 8.6 dargestellt. Die Anzahl der Vektoren einer Kante hängt vom Diskretisierungsfaktor ab und berechnet sich mit Gleichung 8.7, wobei φ_o dem Öffnungswinkel⁴ der Kante entspricht. Die Anzahl aller Vektoren, die auf einer Ecke errichtet werden, berechnet sich mit Gleichung 8.8, wobei Ω_o dem Öffnungsraumwinkel der Ecke entspricht.

$$n_{\text{Kante}}(f_{\text{eDEGM}}) = \frac{\varphi_o}{2\pi} 2f_{\text{eDEGM}} \quad (8.7)$$

² Dieses Verfahren ist eines der gebräuchlichsten Vernetzungsverfahren für Finite Elemente Methode (FEM)-Modelle.

³ In der linearen Algebra sind Vektoren, die sich durch andere Vektoren darstellen lassen, linear voneinander abhängig.

⁴ Der Öffnungswinkel einer Kante meint hier den Winkel zwischen zwei normalen Vektoren zweier Kanten. Er kann Werte zwischen 0° und 180° annehmen.

$$n_{\text{Ecke}}(f_{\text{eDEGM}}) = \frac{\Omega_o}{4\pi} (12 + 30(f_{\text{eDEGM}} - 1) + 10(f_{\text{eDEGM}} - 2)(f_{\text{eDEGM}} - 1)) \quad (8.8)$$

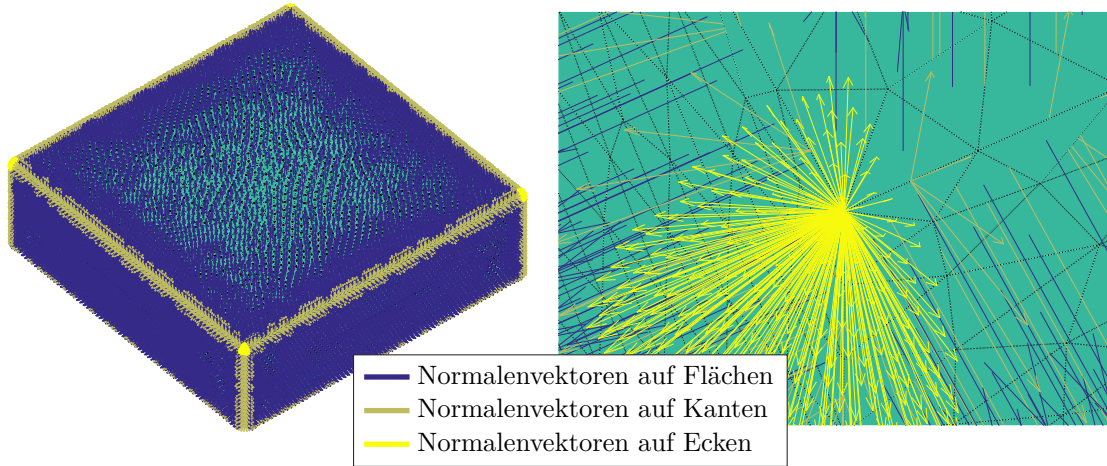


Abbildung 8.6.: Errichten von Normalenvektoren auf allen Flächen, Kanten und Ecken eines Objektes in der Totalen (links) und einer Ecke (rechts) mit einem vergleichsweise geringen Diskretisierungsfaktor von $f_{\text{eDEGM}} = 10$

Im nächsten Schritt wird über jedem Flächen-, Kanten- und Eckenelement eine Blitzkugel erzeugt. Es ist nun der Kugelradius zu finden, bei dem außer dem Aufpunkt gerade kein weiterer Punkt mehr die Kugel berührt. Hierbei wird mit der größtmöglichen Kugel begonnen und überprüft, ob sich Geometriepunkte in ihr befinden. Da immer der Mittelpunkt erzeugt werden und im Anschluss die Distanz zu allen möglichen Punkten errechnet werden muss, ist es sinnvoller, die Kugel zu verkleinern und die bereits aussortierten Punkte aus der Suchmenge zu entfernen. Hiermit verkleinert sich die Suchmenge, und der Algorithmus wird schneller. Ist dies der Fall, wird die Kugelgröße halbiert und das Verfahren so fortgesetzt. Sollten sich keine Punkte innerhalb der Kugel befinden, wird die Kugel wieder vergrößert. Dieses iterative Verfahren erlaubt nach 16 Durchläufen und einem Startradius von 1000 m eine Genauigkeit der Blitzkugel von $\pm 0,75$ cm.

Jeder einzelne Vektor steht auf einem Ecken-, Kanten- oder Flächenelement und zeigt auf den Kugelmittelpunkt einer Blitzkugel. Dieser Punkt repräsentiert jedoch

nicht nur einen Punkt, sondern eine Teilfläche, aus der der angenommene Leitblitzkopf die kürzeste Distanz zum Aufpunkt besitzt. Die Flächenelemente besitzen hierbei verschiedene Abhängigkeiten von der Enddurchschlagstrecke. Abbildung 8.7 zeigt die Abhängigkeiten.

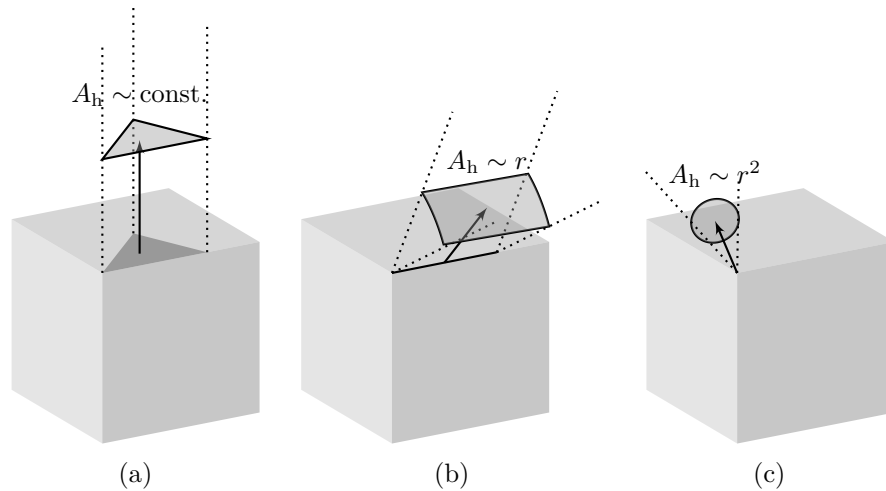


Abbildung 8.7.: Qualitative Darstellung der Konstruktion von Teilhüllflächen einer Struktur und ihre Abhängigkeit im Falle a) eines Flächenelementes, b) eines Kantenelementes und c) eines Eckenelementes

Bei Kanten- und Eckenelementen nimmt die Fläche mit steigendem Radius zu, bei Kanten linear und bei Ecken quadratisch. Bei Kantenelementen werden daher immer die Länge der Kante und der Öffnungswinkel betrachtet, und bei Eckenelementen wird der Raumwinkel Ω benutzt, um die Einfangfläche zu bestimmen.

Im nächsten Schritt können nun die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von negativen und positiven Erstblitzen auf die Vektorlängen übertragen und mit den Flächeninhalten multipliziert werden.

Abschließend liegt nun für jeden Punkt, jede Kante und jede Fläche eine Einfangfläche vor. Diese Einfangflächen können jetzt im einfachsten Fall auf die gesamte Einfangfläche eines Objektes bezogen werden und stellen so ein Maß für die Wahrscheinlichkeit eines Blitzeinschlags an einem betreffenden Element dar. Gleichzeitig kann jedoch auch jede Einfangfläche auf einen Quadratkilometer und die Erdblitzdichte bezogen werden, womit ein absoluter Wert für die Anzahl an Blitzeinschlägen pro Quadratkilometer und Jahr vorliegt.

8.2.3. Darstellungsform der eDEGM-Ergebnisse

Die eigene Simulationsmethodik zum eDEGM berechnet die Einfangflächen in m^2 . Für die Darstellung der Ergebnisse in den dreidimensionalen Ansichten können in einem ersten Schritt die maximalen Blitzkugelradien jedes Elementes dargestellt werden. Dies ist in Abbildung 8.8 zu sehen.

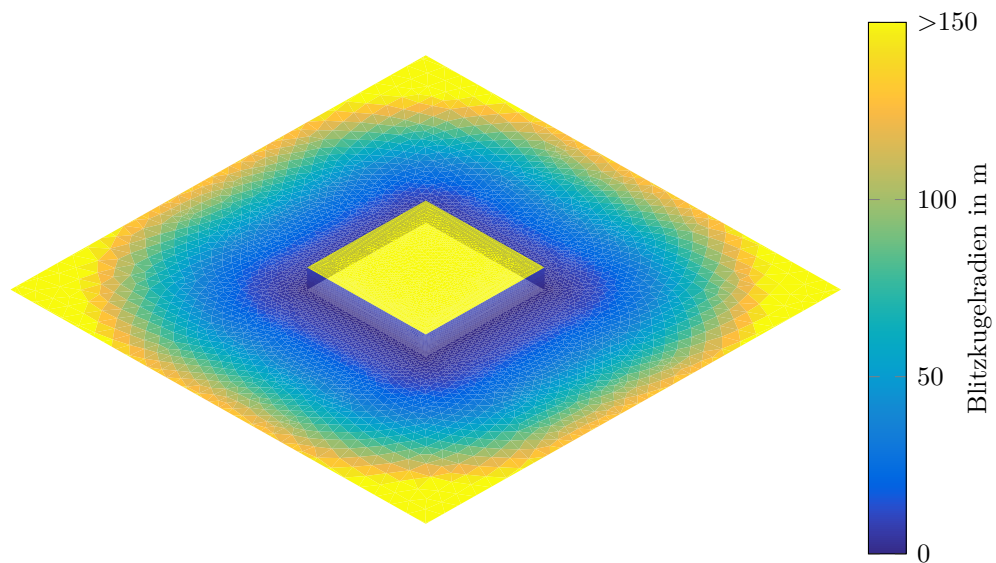


Abbildung 8.8.: Darstellung der maximalen Blitzkugelradien an einem Standardgebäude auf ebener Erde

Man erkennt das Standardgebäude mit quadratischer Grundfläche ($H \times B \times T$: $10 \text{ m} \times 40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$) auf ebener Erde. Auf dem Gebäudedach sind alle Blitzkugelradien möglich, weshalb hier der maximale Blitzkugelradius von 1000 m berechnet wird. In der Darstellung beträgt der maximale Skalenwert 150 m , weshalb dieser auf dem Dacht abgebildet wird. An den Seiten sind am oberen Ende des Gebäudes Blitzkugelradien möglich, die der Gebäudehöhe entsprechen, denn jede Blitzkugel ist nur in der Lage, das Gebäude tangential zu berühren.

Für jede einzelne Fläche kann nun die wirksame Einfangfläche berechnet werden. Hierfür werden der maximale Blitzkugelradius, der Flächeninhalt der Grundfläche und die zu gewichtende Dichteverteilung benötigt. Auch für Kanten und Ecken werden Blitzkugelradien berechnet. Jedem Blitzkugelradius ist darüber hinaus ein jeweiliger Öffnungswinkel zugeordnet, mit dem nun auch für jedes dieser Teilelemente

eine wirksame Einfangfläche berechnet werden kann. Überträgt man die Einfangflächen auf die diskretisierten Gebäudeflächen, dann ergibt sich die Darstellung in Abbildung 8.9.

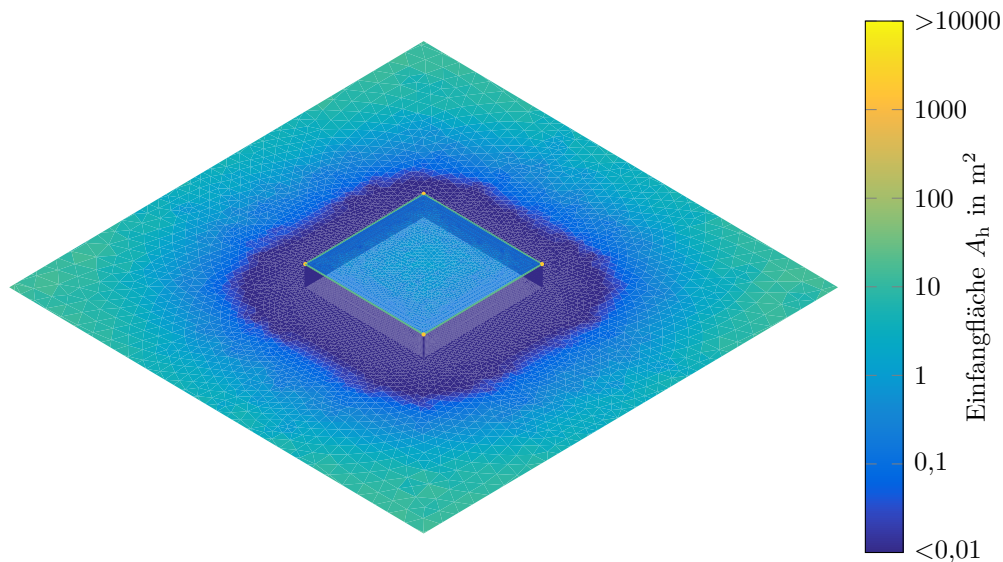


Abbildung 8.9.: Darstellung der Einfangflächen A_d an einem Standardgebäude auf ebener Erde

Man erkennt nun schon recht gut, welche Bereiche eine höhere Einfangfläche besitzen als andere. Zu beachten ist jedoch die logarithmische Farbskala. Sie zeigt deutlich, wie wenig wahrscheinlich es ist, dass ein Blitz eine Fläche trifft. Es ist jedoch auch erkennbar, dass die Flächen kein homogenes Bild erzeugen. Es handelt sich hierbei nicht um numerische Ungenauigkeiten oder Rechenfehler. Die Unregelmäßigkeit ist der unregelmäßigen Vernetzung geschuldet, bei der alle Flächen- und Kantenelemente unterschiedlich groß sind. Eine Fläche von $1 m^2$ besitzt eine geringere Wahrscheinlichkeit von einem Blitz getroffen zu werden, als eine größere Fläche, wenn alle anderen Parameter gleich sind. Alle Einfangwahrscheinlichkeiten auf Flächenelementen werden auf eine einheitliche Fläche bezogen. Abbildung 8.10 stellt alle unregelmäßig vernetzten Dreiecke mit ihrem Flächeninhalt dar.

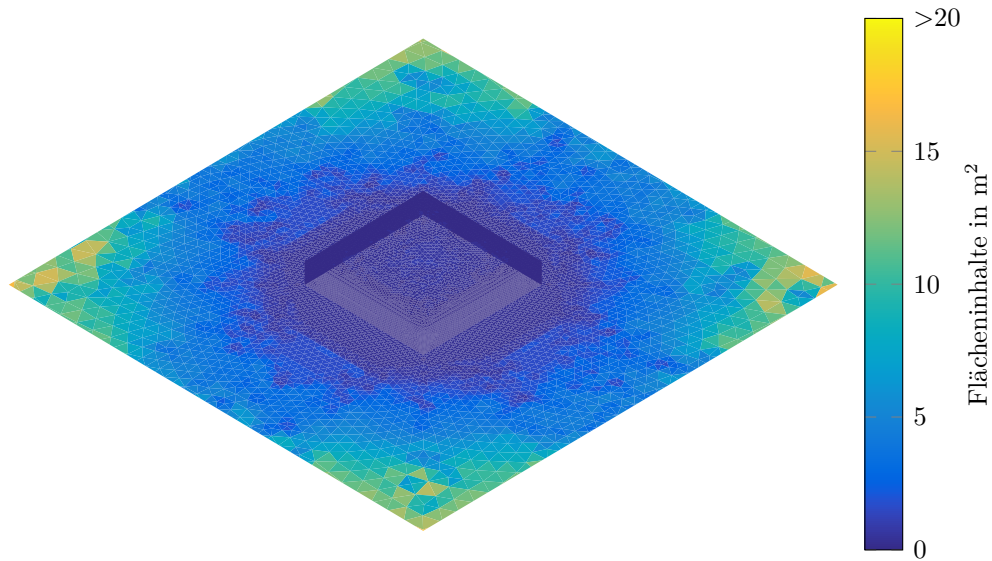


Abbildung 8.10.: Darstellung der Flächeninhalte aller diskretisierten Einzelflächen an einem Standardgebäude auf ebener Erde

Man erkennt, dass die Flächen am Gebäude feiner diskretisiert wurden als in größerer Entfernung. Kleinere Flächen besitzen natürlich auch kleinere Einfangflächen. Die Einfangfläche selber ist zwar ein gutes Maß, um zu beurteilen, wie häufig ein Element oder die Gesamtheit vieler Elemente getroffen werden aber um eine Vergleichbarkeit hinsichtlich der Einfangwahrscheinlichkeit zu gewährleisten, sollten in dieser Auswertung alle Einfangflächen auf einen Wert bezogen werden. Hierbei ist es sinnvoll, bei Flächenelementen die Einfangfläche auf den Flächeninhalt zu beziehen. Bezieht man diesen Wert zusätzlich auf einen Quadratkilometer, so kann, mit der lokalen Erdblitzdichte multipliziert, die zu erwartende Anzahl von Blitzeinschlägen an einem Element oder der Summe von verschiedenen Elementen berechnet werden. In allen Auswertungen werden alle Flächen auf einen Quadratmeter und alle Kanten auf einen Meter bezogen. Alle so erhaltenen Werte werden durch $1 \cdot 10^6$ geteilt. Für die Standortsuche ist dieser Parameter entscheidend. Beispielhaft ist in Abbildung 8.11 die Lösung für das Standardgebäude dargestellt. Mit der einheitlichen Bezugsgröße kann auch der Erdboden eingefärbt werden.

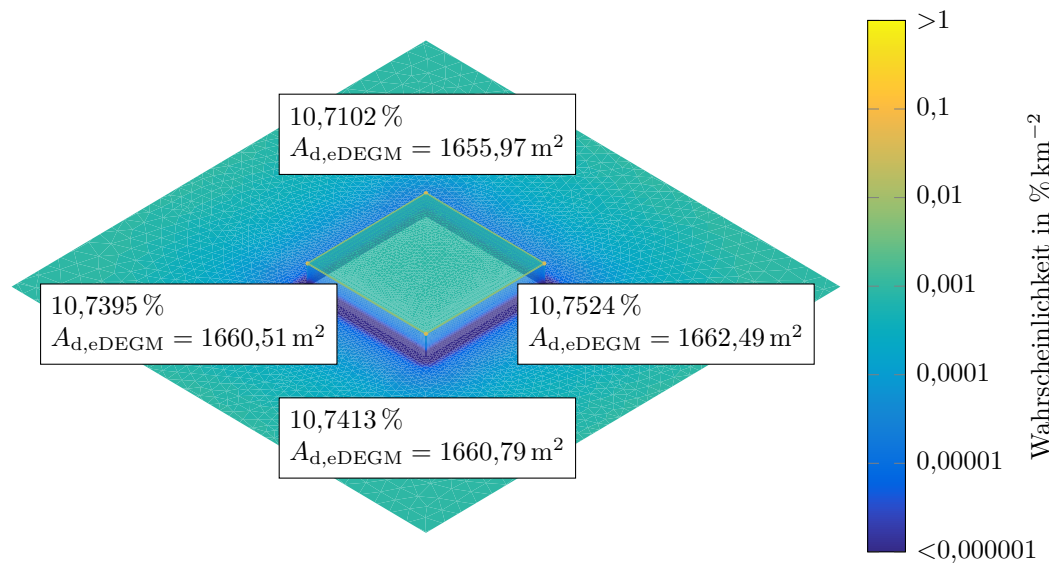


Abbildung 8.11.: Berechnung eines Standardgebäudes ($H \times B \times T$: $10 \text{ m} \times 40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$) mit dem eDEGM bei einem Diskretisierungsfaktor von $f_{\text{eDEGM}} = 50$ und Ausgabe der Einfangflächen aller vier Eckenelemente

Da dieses Standardgebäude genauso auch von Kern berechnet wurde, sind in diesem Beispiel zusätzlich die prozentualen Werte für die Einschlagswahrscheinlichkeit auf den vier Ecken in Relation zur gesamten Einfangfläche des Standardgebäudes bezogen worden. Die so berechneten Werte sind von Kern zwar nicht identisch, jedoch sehr ähnlich berechnet worden [KSM 2010]. Man erkennt außerdem, dass die Ecken nicht identische Einfangflächen besitzen, was im Wesentlichen mit der Anordnung der Richtungsvektoren auf den Ecken zusammenhängt. Werden mehr Vektoren verwendet, so kommt es zu einer immer gleichmäßigeren Verteilung. Das Maß hierfür ist der Diskretisierungsfaktor f_{eDEGM} .

In den Berechnungen von Kern werden die Wahrscheinlichkeiten für einen Einschlag in eine der vier Ecken mit einer Wahrscheinlichkeit mit 11,52 % berechnet. Der Grund für diese Abweichung kann in der diskreteren Betrachtung, der dort verwendeten maximalen Blitzkugelgröße von 300 m oder an anderen Einflussfaktoren liegen. An dieser Stelle ist es sinnvoll, die Berechnungen analytisch zu wiederholen und zu vergleichen. Aus diesem Grund wurden alle einhüllenden Flächen des Standardgebäudes analytisch beschrieben und die Einfangflächen bestimmt. Es ergeben sich die Werte in Tabelle 8.3.

Tabelle 8.3.: Analytische und Simulationslösung ($f_{\text{eDEGM}} = 300$) bei zwei unterschiedlichen maximalen Blitzkugelradien (300 m und 1000 m) für das Standardgebäude

Gebäudeelement	$A_{\text{d,analytisch}}$	$\frac{A_{\text{d,analytisch}}}{A_{\text{d,ges,analytisch}}} \cdot 100 \%$	$A_{\text{d,eDEGM},300 \text{ m}}$	$A_{\text{d,eDEGM},1000 \text{ m}}$
Dachkante	1804,1 m ²	11,6420 %	1769,0 m ²	1804,1 m ²
Dachfläche	1601,5 m ²	10,3345 %	1586,0 m ²	1601,4 m ²
Seitenwand	0,0835 m ²	0,000 54 %	0,8347 m ²	0,8347 m ²
Seitenkante	0,0225 m ²	0,000 14 %	0,0225 m ²	0,0225 m ²
Dachecke	1669,5 m ²	10,7737 %	1606,3 m ²	1669,5 m ²

Es sind zwei Dinge erkennbar. Zum Einen hat der maximale Blitzkugelradius einen sehr wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse. Zwar beträgt die Auftretenswahrscheinlichkeit für eine Blitzkugel von 300 m nur noch $0,0151 \% \text{ m}^{-1}$, jedoch nimmt die Einfangfläche quadratisch mit dem Abstand zu. Geht man von einer Vollkugel aus, so ist der Flächeninhalt mit $A(r = 300 \text{ m}) = 1,131 \text{ km}^2$ eine Größenordnung größer als die Wahrscheinlichkeit. Der Effekt verschwindet erst annehmbar nach 1000 m, wo die Wahrscheinlichkeit auf einen Wert von $0,000 066 839 6 \% \text{ m}^{-1}$ abnimmt und damit eine Größenordnung kleiner wird, als die Oberfläche einer Vollkugel mit $A(r = 1000 \text{ m}) = 12,567 \text{ km}^2$ größer wird. Zum Zweiten ist erkennbar, dass es das eDEGM erlaubt, wesentlich genauer und schneller mit dem DEGM zu rechnen.

8.2.4. Beschreibung der Lösung hochkomplexer Geometrien mit dem HHLR

Zu Beginn des Jahres 2014 wurde der an der TU Darmstadt befindliche Hochleistungsrechner erweitert. Der Hochleistungsrechner wurde in zwei Stufen ausgebaut. Dabei erreichte die Hardware der ersten Stufe mit rund 800 Rechenknoten bereits eine über zwanzigfache Gesamtrechenleistung gegenüber dem alten Cluster. In einer zweiten Stufe wurden weitere 632 Rechenknoten ergänzt. Das System hat damit eine theoretische Spitzenleistung von etwa 1 PFLOPs⁵. Das komplexe System wird einmalig von Bund und Land Hessen mit rund 15 Mio. Euro gefördert [HHL 2014]. Der HHLR kann von den Mitarbeitern und Studierenden der TU Darmstadt nach

⁵ Floating Point Operations per Second

einer Anmeldung genutzt werden. Speziell in Hinblick auf MATLAB® und das eDEGM sind vor allem viele Rechenkerne von Vorteil. Für den hiesigen Anwendungsfall sind vor allem die MEM⁶-Knoten interessant, da auf ihnen mit 64 oder 60 (Ausbaustufe 2) Kernen und einem Gesamtspeicher von 1 TB gerechnet werden kann.

Der im Rahmen dieser Arbeit entstandene Quelltext wurde auf die parallele Lösung hin optimiert. Die Objektdaten werden parallel eingelesen, analysiert und die Vektoren errichtet. Alle Blitzkugelradien werden parallel ermittelt. Die Paketgrößen für die Parallelisierung werden entsprechend dem Amdahlschen Gesetz⁷ optimiert. Auch die Gewichtung der Blitzkugelradien wird parallelisiert durchgeführt. Auf diese Weise sind hochkomplexe CAD-Modelle mit Parameterstudien untersuchbar.

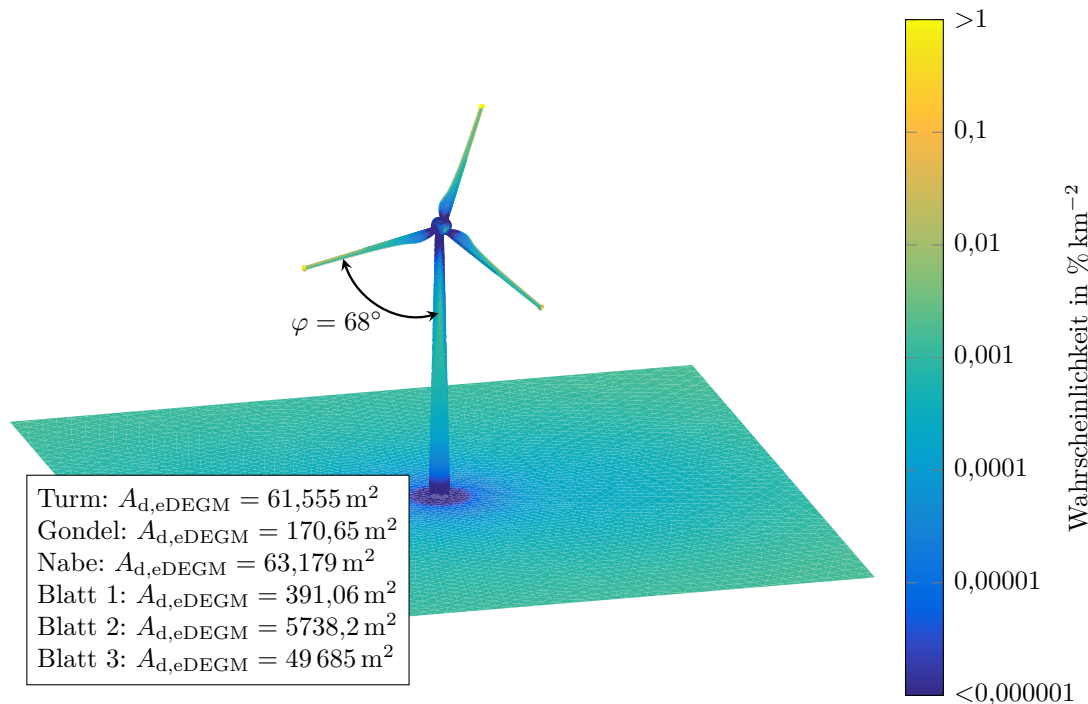


Abbildung 8.12.: Berechnung einer Windenergieanlage mit einer Nabenhöhe von 50 m und einem Rotordurchmesser von 48 m (E-48, ENERCON) bei einer Winkelstellung von 68°

Als Beispiel für eine hochkomplexe Lösung ist in Abbildung 8.12 das Modell ei-

⁶ Sektion für Anwendungen, die sehr viel Hauptspeicher benötigen.

⁷ Beschreibt die Begrenzung des Leistungszuwachs paralleler Prozesse durch den Anteil sequentieller Rechenanteile.

ner Windenergieanlage zu sehen, welche hinsichtlich der Einfangwahrscheinlichkeit bei unterschiedlichen Rotationsstellungen untersucht wurde. So hat sich gezeigt, dass, wenn nur ein Rotorblatt gerade nach oben zeigt (60°), der höchste Punkt dort die größtmögliche Einfangfläche erzeugt, die gesamte Windenergieanlage jedoch die größte Einfangfläche erzeugt wenn zwei Rotorblätter symmetrisch in die Höhe zeigen (0°) [Han 2014].

8.3. Allgemeine Erkenntnisse zum Aufstellen von Fangstangen

Um bei der Auswahl von Standorten eine bessere Abschätzung zu der Einfangwahrscheinlichkeit von Fangstangen an Gebäuden zu treffen, ist es sinnvoll, Untersuchungen mit verschiedenen Fangstangenkonfigurationen an unterschiedlichen Gebäudekonfigurationen mit dem eDEGM durchzuführen. Häufig stellt sich die Frage, wie ein Standort idealerweise beschaffen sein muss, und ob es beispielsweise mehr Sinn ergibt, die Fangstange in der Gebäudemitte oder an einer Ecke zu positionieren. Auch die Frage nach umgebenden Gebäuden oder Vegetation ist häufig diffus, was sich auch in der Risikoabschätzung widerspiegelt. Aus diesem Grund werden nun verschiedene allgemeine Untersuchungen durchgeführt, die diese Fragen im klären. Hier werden eindeutige Planungshinweise abgeleitet. Bei allen Untersuchungen wird mit dem bereits bekannten Standardgebäude mit quadratischer Grundfläche gearbeitet, welches in Abbildung 8.13 mit allgemeinen Werten bemaßt ist. Weiterhin ist eine Umgebung zu erkennen, welche in ihrer Höhe und dem Abstand zum Standardgebäude verändert werden kann. Die Fangstange kann in ihrer Höhe und der Position auf dem Dach verschoben werden. Eine der Betrachtungen wird zusätzliche Fangstangen in Konkurrenz betrachten. Bei allen Untersuchungen wird der Fokus auf die Einfangwahrscheinlichkeit der Fangstange und nicht die des Gebäudes gelegt, somit kann eine effektive Fangstange eventuell viele Blitze einfangen, muss das Gebäude deswegen aber nicht effektiv schützen.

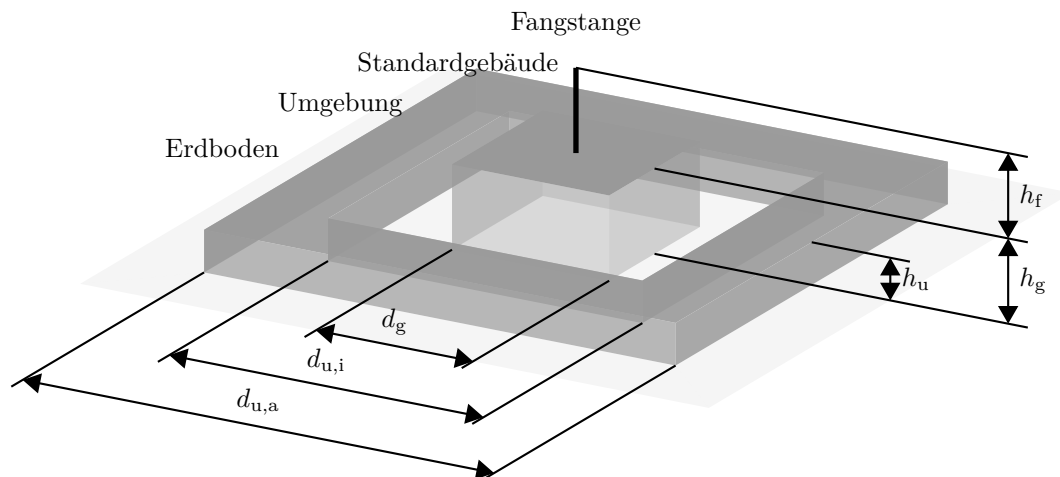


Abbildung 8.13.: Bemaßung eines quadratischen Standardgebäudes der Kantenlänge d_g und einer Höhe h_g mit einer simulierten Umgebung mit einer inneren Breite von $d_{u,i}$, einer äußeren Breite von $d_{u,a}$ und einer Höhe von h_u und einer Fangstange von variabler Höhe und Aufstellort

8.3.1. Einfluss der Fangstangenhöhe auf die Einfanghäufigkeit

In einer ersten Analyse soll eine Fangstange über ebenem Boden betrachtet werden. Hierbei sind also die Höhen der Umgebung h_u und des Standardgebäudes h_g Null. Die Höhe der Fangstange h_f wird in einem Bereich zwischen 0 m und 50 m variiert. Alle Parameter sind in Tabelle 8.4 zu sehen, und die Ausgabe zeigt Abbildung 8.14. Es ist ein linearer Zusammenhang zwischen der Höhe der Fangstange und der Einfangwahrscheinlichkeit zu erkennen, der erst bei Fangstangen mit unrealistischer Höhe verloren geht. Dieser Zusammenhang bedeutet, dass es mit zunehmender Höhe der Fangstange immer wahrscheinlicher wird, dass ein Blitz die Fangstange erreichen kann.

Tabelle 8.4.: Konfiguration der Simulationsparameter

Parameter	Beschreibung	Simulationswerte
h_f	Höhe Fangstange	0 m bis 50 m
h_g	Höhe Gebäude	0 m
h_u	Höhe Umgebung	0 m
d_g	Breite Gebäude	40 m
$d_{u,i}$	Breite Umgebung (innen)	60 m
$d_{u,a}$	Breite Umgebung (außen)	160 m

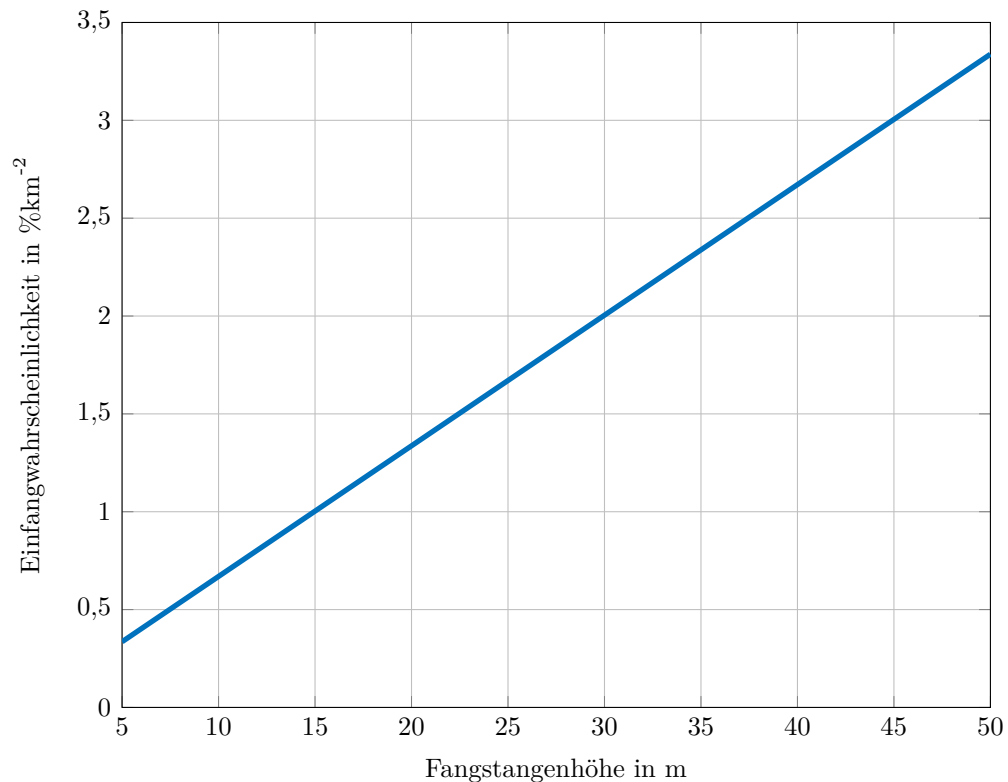


Abbildung 8.14.: Einfangwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Höhe einer Fangstange h_f zwischen 0 m und 50 m bei Aufstellung auf ebenem Boden

Generell lässt sich hieraus die Aussage ableiten, dass eine höhere Fangstange auch eine größere Wahrscheinlichkeit besitzt, durch Blitze getroffen zu werden, sowohl weil die Fangstange die Ionisierungszonen ladungsreicherer Blitze früher schneidet, als auch weil die Wahrscheinlichkeit für Seiteneinschläge aufgrund der ausgedehnten Struktur steigt. Dieser Zusammenhang ist dadurch erklärbar, dass die Einfangfläche aufgrund des zylindrischen Teils der Fangstange eine immer größere Einfangfläche generiert und die Spitze erst wesentlich später mit dem Erdboden in Konkurrenz tritt. Illustriert ist dieser Sachverhalt in Abbildung 8.15. Eine optimale Höhe leitet sich demnach aus der maximalen, wirtschaftlich realisierbaren Höhe ab. Diese wird durch die, für die Windlast, benötigte Konstruktion beeinflusst.

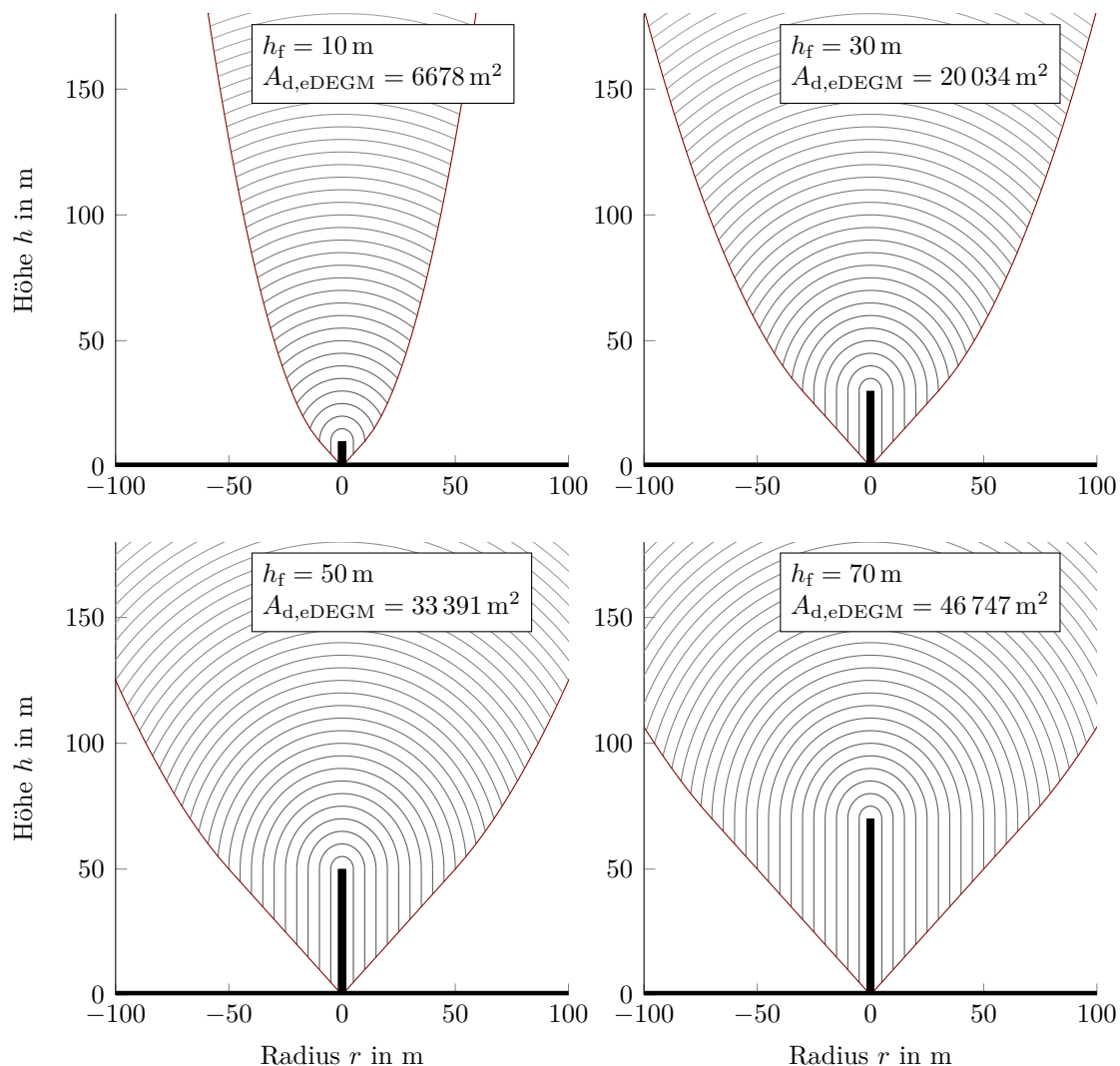


Abbildung 8.15.: Entwicklung der kumulierten und gewichteten Einfangflächen (grau) in Abständen von 5 m an vier unterschiedlich hohen Fangstangen, mit $h_f = 10 \text{ m}$, 30 m , 50 m und 70 m und das resultierende Fangvolumen (rot)

Man erkennt in Abbildung 8.15 zudem ein Einfangvolumen, welches innerhalb der roten Kontur liegt. Dieses bedeutet nicht, dass jeder Blitz, welcher in dieses eintaucht, auch eingefangen wird. Lediglich Blitze mit einer entsprechenden Enddurchschlagstrecke terminieren innerhalb des Volumens auf der Fangstange. Die Methode erzeugt Grafiken, die stark an die CVM erinnern. Im Grunde wird hier auch etwas sehr ähnliches gemacht, mit dem Unterschied, dass der Fangstange kein Überhöhungsfaktor zugeordnet wird.

8.3.2. Abhängigkeit der Gebäudehöhe auf die Einfanghäufigkeit einer Fangstange

In urbanen Gebieten sind Freiflächen für Fangstangen nicht realisierbar. In der Regel wird man entweder bereits installierte Fangstangen nutzen oder speziell für diese Untersuchung Fangstangen aufstellen. Üblicherweise werden in Deutschland Häuser mit einer Vielzahl von kurzen Fangstangen geschützt. Die Installation der LPDMU an einer dieser Fangstangen ist äußerst uneffektiv, weswegen explizit Fangstangen errichtet werden sollen. Hierbei liegt die Höhe kommerzieller Fangstangen in einem Bereich bis 12 m. Ausschlaggebend ist in der Regel die Windlast, die mit der Höhe quadratisch zunimmt. Es ist jetzt interessant zu erfahren, in wie weit die Gebäudehöhe einen Einfluss auf die Ausbeute von Einschlägen besitzt. Der Zusammenhang dreier unterschiedlich hoher Fangstangen mit 10 m, 20 m und 30 m in der Mitte des Gebäudedaches ist in Abbildung 8.16 dargestellt. Die Simulationsparameter fasst Tabelle 8.5 zusammen.

Tabelle 8.5.: Konfiguration der Simulationsparameter

Parameter	Beschreibung	Simulationswerte
h_f	Höhe Fangstange	10 m, 20 m und 30 m
h_g	Höhe Gebäude	5 m bis 50 m
h_u	Höhe Umgebung	0 m
d_g	Breite Gebäude	40 m
$d_{u,i}$	Breite Umgebung (innen)	60 m
$d_{u,e}$	Breite Umgebung (außen)	160 m

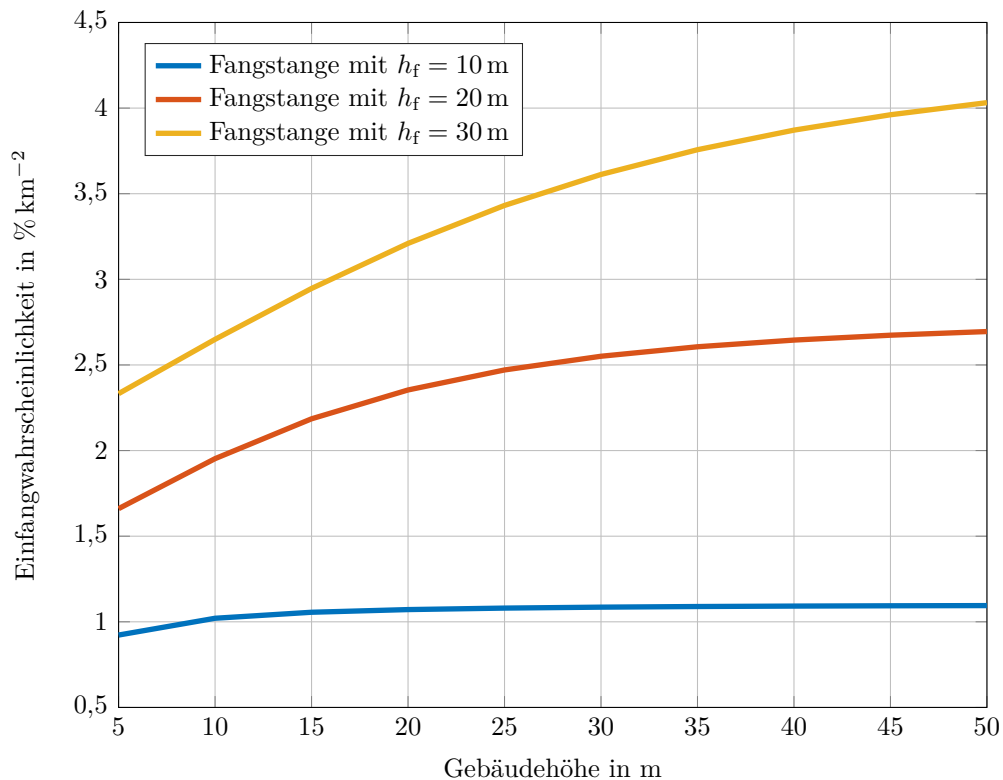


Abbildung 8.16.: Abhängigkeit der Einfangwahrscheinlichkeit von drei verschiedenen Fangstangen in der Mitte des Daches in Abhängigkeit der Höhe des Standardgebäudes

Man erkennt recht deutlich, dass es je nach Höhe des Gebäudes und der Fangstange zu einem Sättigungseffekt kommt, der die Effektivität der jeweiligen Fangstange mindert. Das hängt im Wesentlichen damit zusammen, dass bei großen Gebäuden große Enddurchschlagstrecken an den Ecken und Kanten des Gebäudes terminieren und so das Einfangvolumen der Fangstange beschnitten wird. Um dies genauer zu erklären, wurden in Abbildung 8.17 die Einfangflächendichteverteilungen der Fangstangen und der Gebäude bei vier markanten Fällen angefertigt. Hierbei wurde der Fall ohne sowie mit einem Gebäude betrachtet. Die Gebäudehöhen betragen 10 m, 30 m und 50 m. In allen vier Fällen besitzt die Fangstange eine Höhe von 20 m. Die Fälle befinden sich auf dem roten Verlauf in Abbildung 8.16.

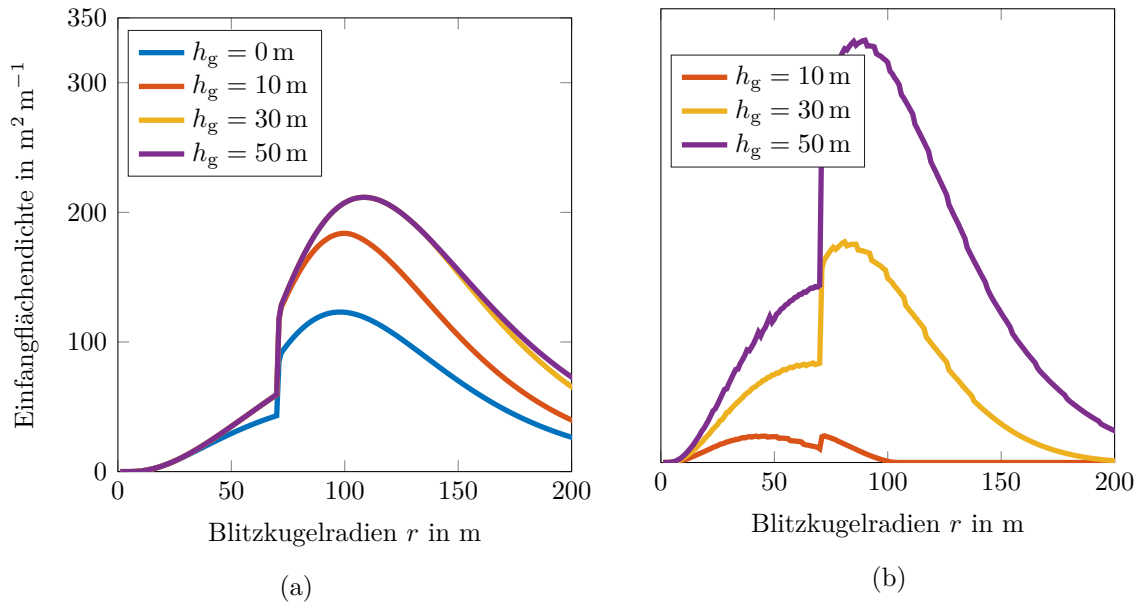


Abbildung 8.17.: Einfangflächendichteverteilungen an a) der Fangstange der Höhe $h_f = 20 \text{ m}$ und b) des Standardgebäude bei vier verschiedenen Standardgebäudehöhen $h_g = 0 \text{ m}$, 10 m , 30 m und 50 m über den Blitzkugelradius r in Quadratmeter pro Blitzkugelradius

Man erkennt nun deutlich, dass die Fangstange bei einer niedrigen Gebäudehöhe mit ihrer großen Einfangfläche das Gebäude überspannt und schützt. Wird das Gebäude höher, werden einerseits Seiteneinschläge wahrscheinlicher, und andererseits können nun größere Kugeln die Kanten des Gebäudes erreichen. Hiermit steigen die in Betracht zu ziehenden Blitzkugelradien und Blitzstromscheitel. Dieser Umstand wird durch Abbildung 8.18 sehr deutlich, in der die Überschreitungswahrscheinlichkeiten für Blitzstromscheitel gegenüber gestellt. Hier zeigt sich nun auch sehr deutlich, dass eine einfache zentrale Fangstange auf einem Gebäude sehr effektiv ist, jedoch bei höheren Gebäuden immer größere Stromscheitel passieren lässt. Mit höheren Gebäuden steigt die Wahrscheinlichkeit für Gebäudetreffer. Man erkennt hier weiterhin auch, dass die Dichte durch die Höhe der Fangstange beeinflusst wird. Dieser Punkt wurde bei der Erstellung der CIGRÉ-Kurve nie berücksichtigt, weswegen es denkbar ist, dass die zugrunde liegende Verteilung „schief“ sein kann.

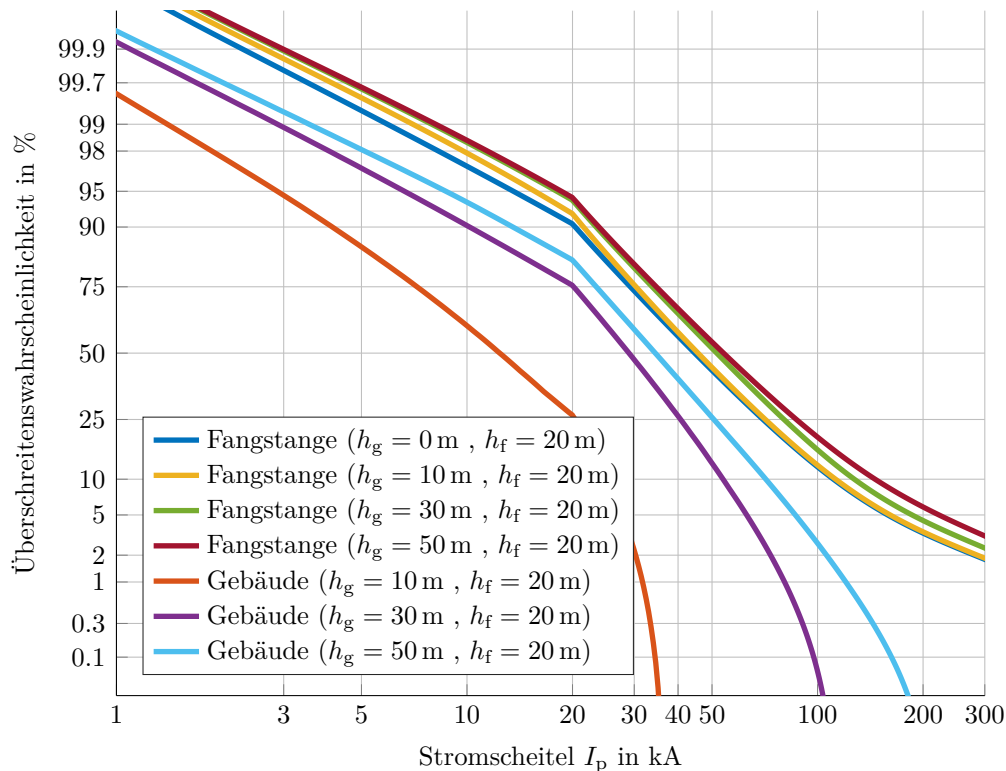


Abbildung 8.18.: Überschreitungswahrscheinlichkeiten für Blitzstromscheitelwerte I_p aller Fangstangen und Standardgebäude bei den vier unterschiedlichen Fällen

8.3.3. Einfluss der Entfernung des Aufstellgebäudes zu anderen Gebäuden

Errichtet man eine Fangstange mit einer Höhe von $h_f = 10 \text{ m}$ auf einem Gebäude in zentraler Position, so wird sie einen Standortvorteil besitzen. Üblicherweise befinden sich in urbanen Gegenden weitere Gebäude in direkter Nachbarschaft, welche die Einfangwahrscheinlichkeit der Fangstange beeinflussen können. Ausgehend von einer mittigen Fangstange auf einem Standardgebäude mit der Höhe $h_g = 10 \text{ m}$ wird nun die Umgebung in der Höhe zwischen 5 m und 30 m variiert. Dabei besitzt sie einen Abstand von 10 m bis 30 m zur Umgebung ($d_{u,i} = 60 \text{ m}$ bis 100 m). Das Ergebnis dieser Simulationen zeigt Abbildung 8.19. Die Simulationsparameter fasst Tabelle 8.6 zusammen.

Tabelle 8.6.: Konfiguration der Simulationsparameter

Parameter	Beschreibung	Simulationswerte
h_f	Höhe Fangstange	10 m
h_g	Höhe Gebäude	10 m
h_u	Höhe Umgebung	0 m bis 30 m
d_g	Breite Gebäude	40 m
$d_{u,i}$	Breite Umgebung (innen)	60 m, 80 m und 100 m
$d_{u,e}$	Breite Umgebung (außen)	160 m

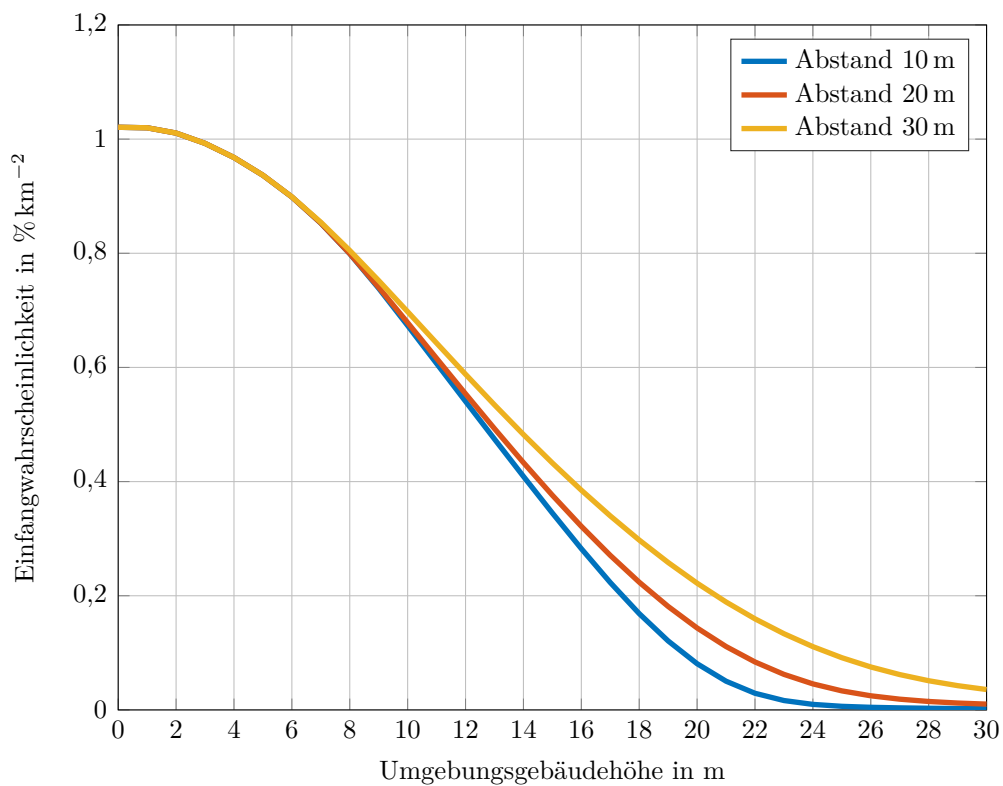


Abbildung 8.19.: Einfluss der Höhe der Umgebung bei drei verschiedenen Abständen zur umgebenden Bebauung auf die Einfangwahrscheinlichkeit einer auf dem Standardgebäude ($h_g = 10$ m) mittig aufgestellten hohen Fangstange ($h_f = 10$ m)

Man erkennt zu Beginn in allen drei Fällen eine nahezu unbeeinflusste Einfangwahrscheinlichkeit. Die Wahrscheinlichkeit deckt sich mit derjenigen aus Abbildung 8.16, wenn die Umgebungshöhe mit 0 m angenommen wird. Man erkennt weiterhin deutlich, dass die Effektivität in allen drei betrachteten Fällen bei einer Umgebung mit

gleicher Höhe (10 m) auf einen Wert sinkt, der mit dem Wert gegenüber ebener Erde nahezu identisch ist (Vgl. 8.14). Sobald die Höhe der Umgebung einen Wert erreicht, der auf dem Niveau der Höhe der Fangstange liegt (20 m), sinkt die Einfangfläche auf einen Wert, der der Fläche entspricht, die sich Umgebung und Fangstange teilen. Ganz überschlägig berechnet Gleichung 8.12 den Wert für den Abstand von 20 m.

$$A_d \approx \frac{\left(\frac{d_{u,i}}{2}\right)^2}{1 \text{ km}^2} \cdot 100 \% \quad (8.9)$$

$$\approx \frac{\left(\frac{60 \text{ m}}{2}\right)^2}{1 \text{ km}^2} \cdot 100 \% = 0,09 \% \text{ km}^{-2} \quad (8.10)$$

$$\approx \frac{\left(\frac{80 \text{ m}}{2}\right)^2}{1 \text{ km}^2} \cdot 100 \% = 0,16 \% \text{ km}^{-2} \quad (8.11)$$

$$\approx \frac{\left(\frac{100 \text{ m}}{2}\right)^2}{1 \text{ km}^2} \cdot 100 \% = 0,25 \% \text{ km}^{-2} \quad (8.12)$$

Die Abweichungen sind dadurch begründet, dass in den Ecken natürlich kein diskreter Übergang zu finden ist, und weiterhin enden einige sehr stromschwache Blitze auf dem Gebäude oder der Umgebung und nicht auf der Fangstange, weswegen hier Einfangflächen abgezogen werden müssen. Wird die Umgebung noch weitere 10 m höher, so wird ein Einschlag in die Fangstange immer unwahrscheinlicher, da es nun immer mehr Blitzkugeln gibt, die nicht mehr die Fangstange erreichen können.

Die Frage, wie nah ein Gebäude überhaupt an dem Aufstellgebäude stehen darf, damit es keinen Einfluss mehr auf die Effektivität der Fangstange hat, soll Abbildung 8.20 klären. Hier wurden vier unterschiedliche Umgebungshöhen angenommen und der Abstand zum Standardgebäude sukzessive erhöht. Tabelle 8.7 fasst die Simulationsparameter zusammen.

Tabelle 8.7.: Konfiguration der Simulationsparameter zur

Parameter	Beschreibung	Simulationswerte
h_f	Höhe Fangstange	10 m
h_g	Höhe Gebäude	10 m
h_u	Höhe Umgebung	10 m, 15 m, 20 m und 30 m
d_g	Breite Gebäude	40 m
$d_{u,i}$	Breite Umgebung (innen)	60 m bis 340 m
$d_{u,i}$	Breite Umgebung (außen)	100 m + $d_{u,i}$

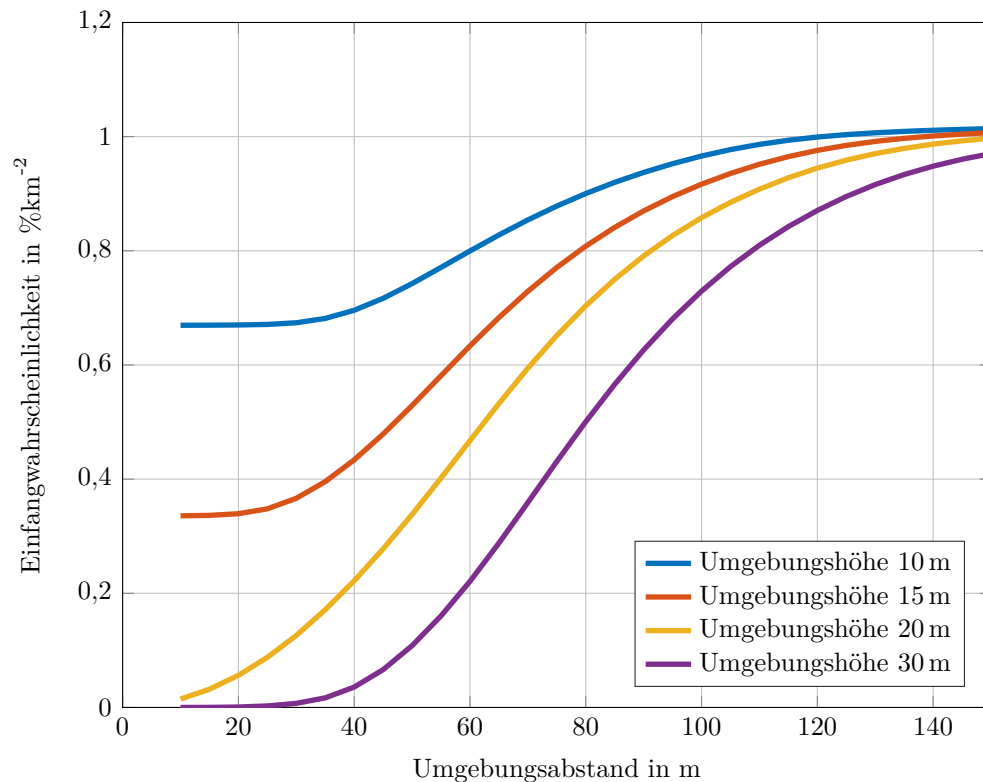


Abbildung 8.20.: Darstellung des Einflusses verschieden hoher Umgebungen auf die Einfangwahrscheinlichkeit einer 10 m hohen Fangstange auf einem 10 m hohen Standardgebäude bei unterschiedlichen Abständen zur Umgebung und vier unterschiedlichen Umgebungshöhen

Es ist nun deutlich erkennbar, dass auch noch Gebäude in einer Entfernung von 150 m die Einfangwahrscheinlichkeit der Fangstange beeinflussen und Fangentladungen erzeugen können, die in Konkurrenz zu denen treten, die die Fangstange erzeugt. Dabei zeigt sich, dass ein Gebäude gleicher Höhe die Wahrscheinlichkeit immer noch stark einschränkt, obwohl die eigene Fangstange die Umgebung mit 10 m überragt. Der Effekt ist erst nach 100 m unbedeutend.

8.3.4. Einfluss des Aufstellortes auf einem Gebäudedach

Sobald ein Gebäude gefunden ist, auf dem eine Fangstange möglichst viele Blitze einfangen können soll, muss ein Ort gefunden werden, an dem die Fangstange aufgestellt werden kann. Der wohl naheliegendste Ort ist häufig in der Mitte des

Gebäudes zu finden. Hier entfaltet die Fangstange die höchste Schutzwirkung, da sich ihr Einfangvolumen mittig über dem Gebäude befindet. Wenn nicht das Schutzziel des Gebäudes im Vordergrund steht, sondern die Anzahl von Blitzeinschlägen maximiert werden soll, kann es jedoch auch sinnvoll sein, in den Randbereich oder gar Ecke vorzudringen. Aus diesem Grund werden Simulationen durchgeführt, die klären sollen, an welcher Stelle die höchste Anzahl von Blitzen erwartet werden darf. Hierfür wird die Fangstange in 45 Simulationen in einem dreieckigen Bereich zwischen Dachecke, Dachzentrum und Dachkante um jeweils 2,5 m verrückt. Hiermit wird ein Achtel des Daches berechnet und im Anschluss grafisch auf die quadratische Grundfläche gespiegelt. Das Ergebnis ist in Abbildung 8.21 zu sehen. Dargestellt ist die Erhöhung der Fangstangeneffektivität auf Isolinien in Prozent im Vergleich zur geringsten Einfangwahrscheinlichkeit, welche sich in der Dachmitte befindet.

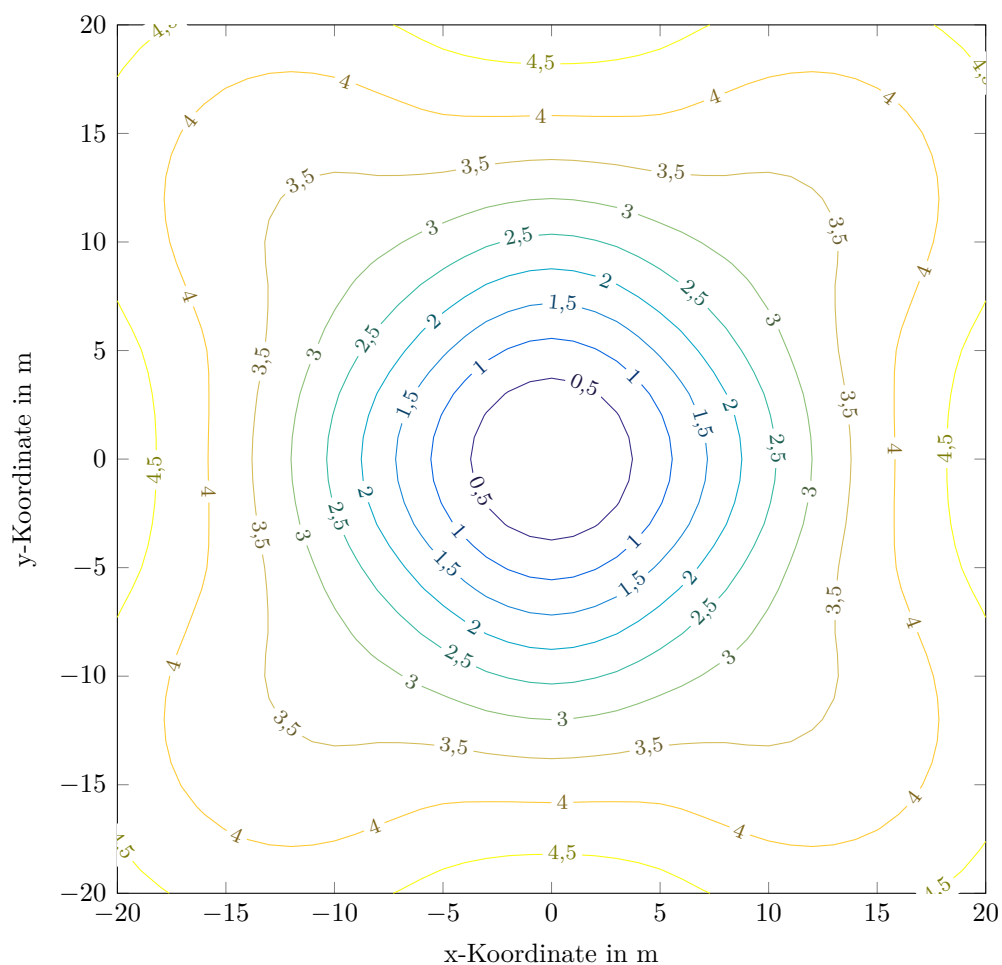


Abbildung 8.21.: Prozentualer Einfluss des Aufstellortes einer 10 m hohen Fangstange auf dem Dach des Standardgebäudes mit einer Höhe von 10 m gegenüber einem zentralen Aufstellort

Man sieht nun schön, dass die Wahrscheinlichkeit zu den Seiten zunimmt. Dabei ist in diesem speziellen Fall die Wahrscheinlichkeit an der Kante etwas höher als an den Ecken, was damit zusammenhängt, dass die Diagonale des Gebäudedaches von einer Ecke zur anderen Ecke 56 m misst, die längste Strecke auf dem Dach von der Kantenmitte zur Dachecke jedoch nur 44,7 m. Insgesamt ist der Einfluss aber noch sehr marginal. Betrachtet man jedoch ein höheres Gebäude mit einer Höhe von 30 m, so steigt zum einen die absolute Einfangwahrscheinlichkeit aufgrund der Höhe, und zum anderen können vor allem an den Ecken Steigerungen der Einfangwahrscheinlichkeit von mehr als 50 % erreicht werden. Abbildung 8.22 zeigt das Ergebnis.

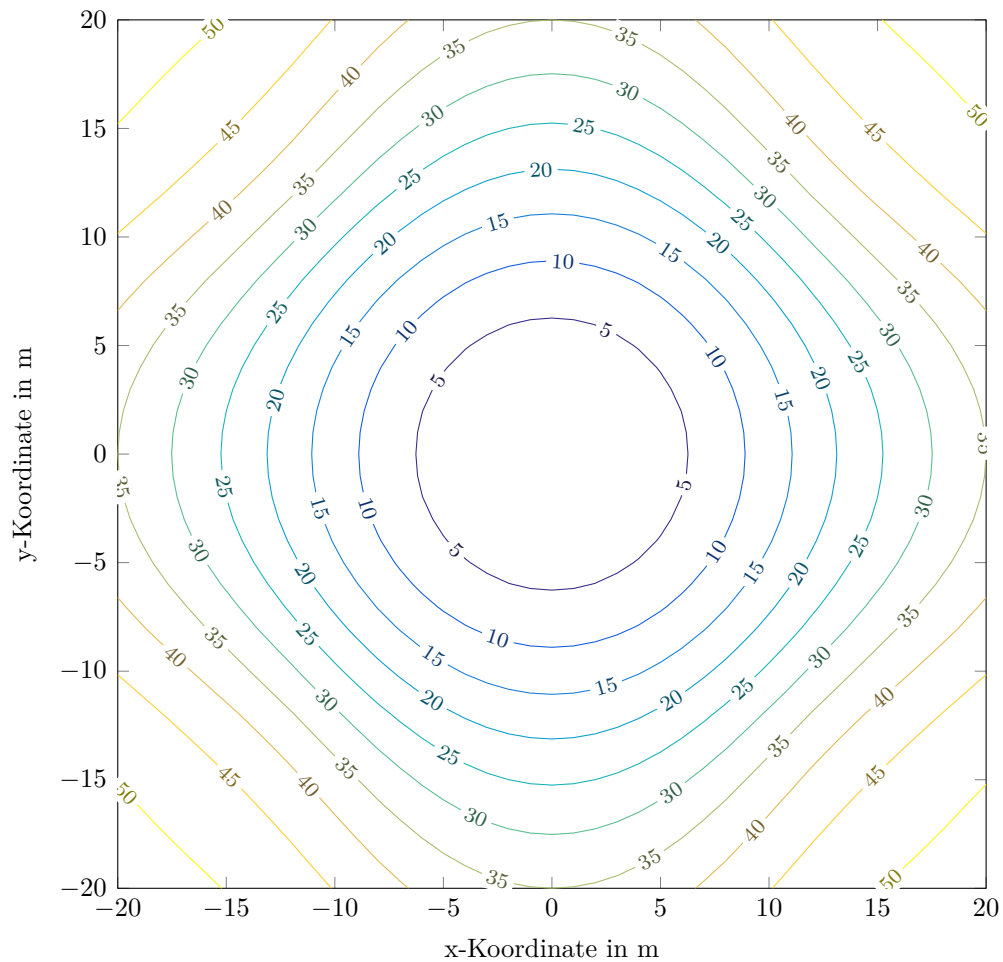


Abbildung 8.22.: Prozentualer Einfluss des Aufstellortes einer 10 m hohen Fangstange auf dem Dach des Standardgebäudes mit einer Höhe von 30 m gegenüber einem zentralen Aufstellort

Führt man die gleiche Simulation mit einer Gebäudehöhe von 50 m durch, so werden an den Ecken Einfangsteigerungen von knapp 100 % im Vergleich zur zentralen Position gefunden. Diese Erkenntnisse beziehen sich jedoch auf freistehende Gebäude. Die Fangstange kann also an Eckpositionen die Höhe des Gebäudes am besten ausnutzen.

8.3.5. Optimale Anzahl von Fangstangen auf einem Gebäudedach

Wie die vorangegangene Untersuchung gezeigt hat, ist es sinnvoll, die Fangstangen nicht in zentraler Lage anzubringen, sondern sie an einer Gebäudeecke zu positionieren. Beim Standardgebäude liegt zwischen den gegenüberliegenden Ecken eine Distanz von 56,6 m, was die Frage aufwirft, wie sinnvoll es ist, eine zweite, dritte oder sogar vierte Fangstange auf dem Gebäude zu platzieren. Da diese Aussage an die Grundfläche des Gebäudes geknüpft ist, soll nun eine Untersuchung folgen, bei der die quadratische Grundfläche eines Gebäudes mit einer Höhe von 30 m vergrößert wird und vier Konfigurationen betrachtet werden. Abbildung 8.23 zeigt die Einfangflächen der vier Konfigurationen.

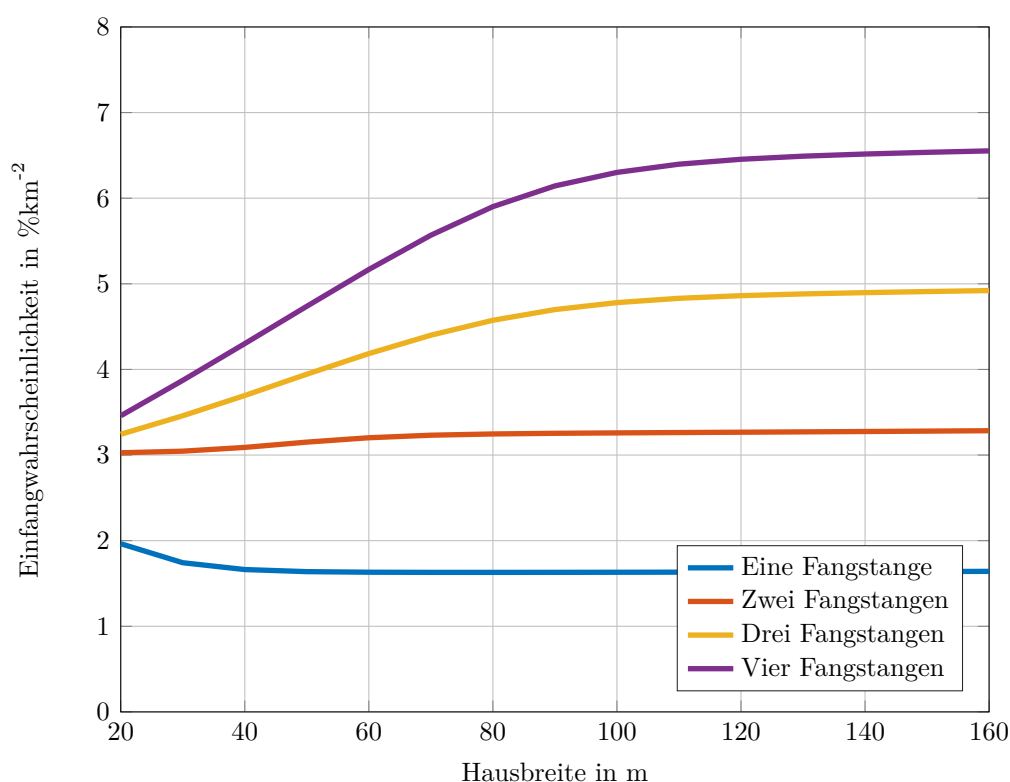


Abbildung 8.23.: Prozentualer Einfluss des Aufstellortes einer 10 m hohen Fangstange auf dem Dach des Standardgebäudes mit einer Höhe von 30 m

Interessant ist, dass die Konfiguration mit nur einer Fangstange bei größeren Gebäuden immer schlechter wird. Das hängt damit zusammen, dass die Blitzkugeln

bei einem sehr kleinen Gebäude dieses überlaufen können. Erst bei größeren Gebäuden können nicht mehr alle Blitzkugeln die Fangstange erreichen. Errichtet man eine zweite Fangstange bei kleinen Gebäuden, ist der Zugewinn erst einmal gering. Zwei Fangstangen heben die Wahrscheinlichkeit für einen Blitzeinschlag bei kleineren Gebäuden nur etwa um 50 % an. Sobald das Gebäude größer wird und die beiden Einfangvolumen immer weiter auseinander laufen, hebt die zweite Fangstange die Einfangwahrscheinlichkeit um 100 %. Ein ähnliches Verhalten ist bei der Konfiguration mit drei und vier Fangstangen erkennbar. Wirklich effektiv werden diese erst bei Gebäuden mit einer Kantenlänge von $d_g = 90$ m.

8.3.6. Zusammenfassung der allgemeinen Erkenntnisse

Dieser Abschnitt hat sich mit der Frage beschäftigt, wie eine Fangstange so aufgestellt werden kann, dass sie eine möglichst große Anzahl an Blitzereignissen einfängt. Der Gebäudeschutz trat im Zuge dieser Untersuchung in den Hintergrund. Nicht immer, aber oft werden die Wahrscheinlichkeiten zu Gunsten der Fangstange dadurch erreicht, dass die Wahrscheinlichkeiten vom Gebäude hin zur Fangstange umverteilt werden. Das ist aber nicht immer der Fall. Die folgenden Hinweise lassen sich ganz allgemein ableiten und decken sich im wesentlichen mit der allgemeinen Erwartungshaltung:

- Je höher eine Fangstange ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass sie ein Blitzereignis einfangen kann.
- Die Fangstange sollte weitestgehend isoliert stehen und keine umliegenden konkurrierenden Fangstangen oder Objekte besitzen. Ist dies nicht gewährleistet, sollte die Fangstange zumindest alle angrenzenden Fangstangen überragen.
- Eine Fangstange kann den Höhenvorteil eines Gebäudes dann ausnutzen, wenn das Gebäude hoch ist und die Fangstange am Rand oder an einer Ecke des jeweiligen Gebäudes platziert werden kann.
- Mehrere Fangstangen konkurrieren untereinander. Die Errichtung einer weiteren oder mehrerer weiterer Fangstangen ist nur dann zielführend, wenn diese weit auseinander stehen. Die Einfangwahrscheinlichkeit jeder einzelnen Fangstange wird auf jeden Fall sinken.

8.4. Hochspannungshalle der TU Darmstadt

Ein naheliegender Ort für die Installation eines Messsystems ist die Hochspannungshalle der TU Darmstadt. Hier wurde eine Fangstange mit einer Höhe von 9 m auf dem Hallendach installiert und an das Erdungssystem angeschlossen. Um die Anzahl der erwarteten Blitzeinschläge zu berechnen, wurde die Erdblitzdichte ermittelt, um im Anschluss eine eDEGM-Simulation durchzuführen. Die Erdblitzdichte an dem Standort beläuft sich auf $N_g = 3,07$. Die Anzahl aller Blitzereignisse in einem Radius von 2 km um die Halle herum ist in Abbildung 8.24 dargestellt [Sel 2016].

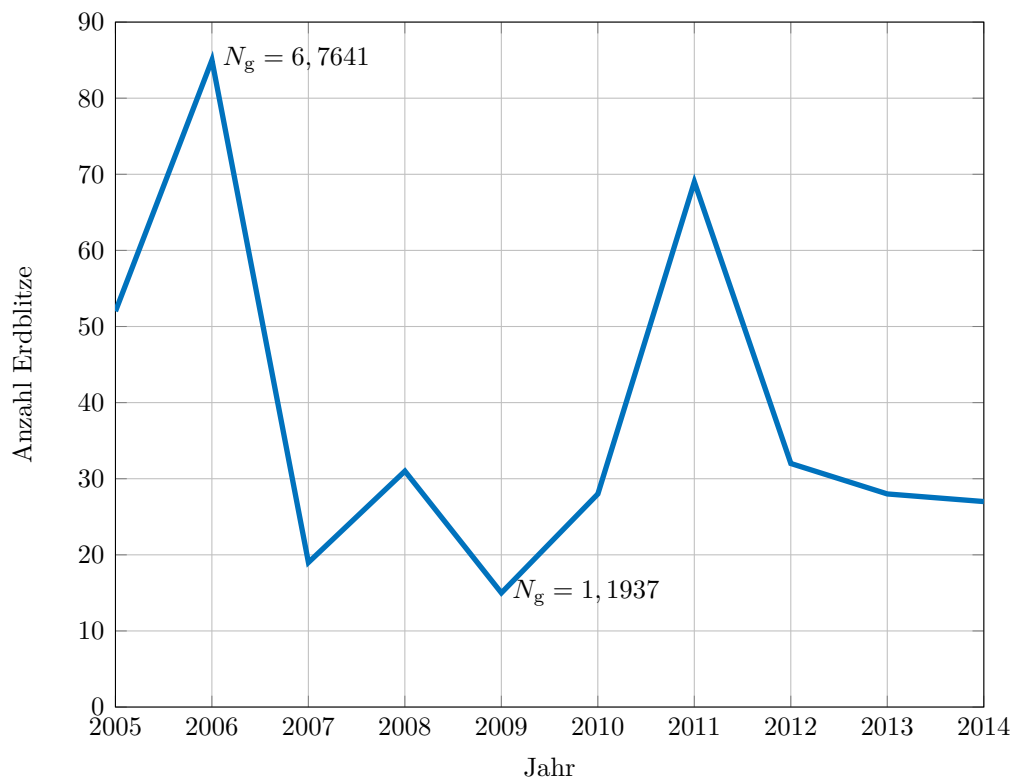


Abbildung 8.24.: Verlauf der Erdblitzdichte in einem Umkreis von 2 km um die Hochspannungshalle der Technischen Universität Darmstadt in den Jahren 2005 bis 2014

Des Weiteren ist der Standort der Hochspannungshalle in Abbildung 8.25 dargestellt. Als Grundlage für die Berechnung diente das 3D-Material, welches für das

„Campus-Navi“⁸ der TU Darmstadt erstellt wurde. Die Daten wurden in COMSOL Multiphysics® eingelesen und mit dem DEGM berechnet. Für eine 9 m hohe Fangstange, welche mittig auf dem 25 m hohen Hallendach aufgestellt ist, lässt sich eine Gesamteinfangfläche von $A_{d,eDEGM} = 9480,3 \text{ m}^2$ berechnen. Zusammen mit der örtlichen Erdblitzdichte ergeben sich für diesen Standort 0,029 Blitzeinschläge pro Jahr. Verschiebt man die Fangstange zur Ecke, steigt die Einfangfläche auf den Wert $A_{d,eDEGM} = 15\,241 \text{ m}^2$. Positioniert man eine zweite Fangstange auf der gegenüberliegenden Ecke so steigt die gesamte Einfangfläche auf einen Wert von $A_{d,eDEGM} = 17\,616 \text{ m}^2$, wobei sich die Wahrscheinlichkeiten entsprechend der Einfangflächen auf $A_{d,eDEGM} = 11\,448 \text{ m}^2$ und $A_{d,eDEGM} = 6168 \text{ m}^2$ aufteilen. Es wurde daher nur eine Fangstange an der Eckposition aufgestellt, denn hiermit lassen sich durchschnittlich 0,046 Blitzeinschläge pro Jahr messen, was einen Einschlag alle 21 Jahre bedeutet.

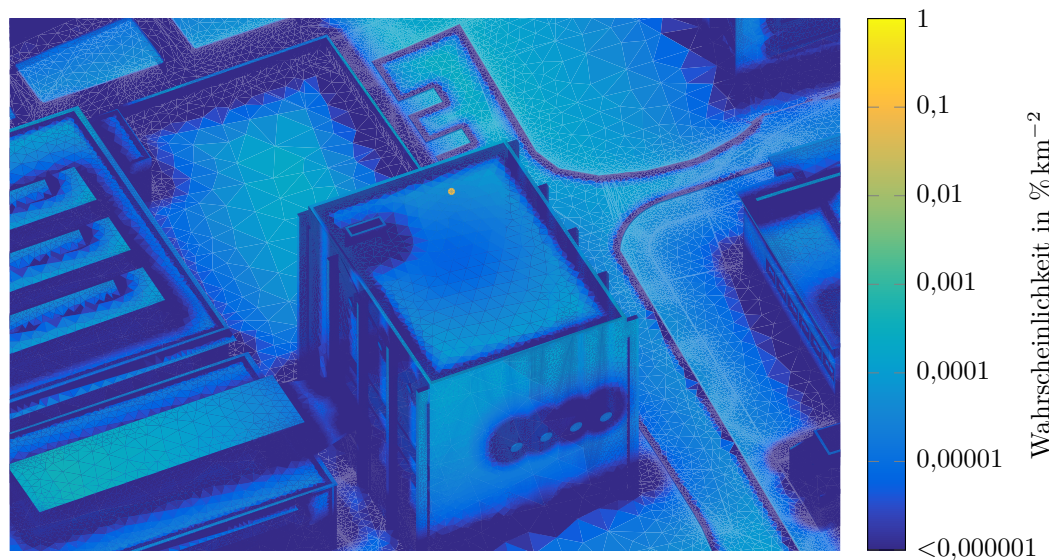


Abbildung 8.25.: Berechnung der Einfangflächen an einem 3D-Modell der Hochspannungshalle der Technischen Universität Darmstadt mit Hilfe des DEGM

⁸ Mit freundlicher Unterstützung durch das Dezernat V – Baumanagement und Technischer Betrieb.

8.5. Versuchsfeld der TU Darmstadt in Griesheim

Ein zweiter sich bietender Standort ist ein freies, gerodetes Feld, welches zum Gelände der TU Darmstadt gehört. Hier wurde ebenfalls eine Fangstange mit einer Höhe von 9 m errichtet. In naher Zukunft soll hier eine Experimentierhalle mit einer Höhe von etwa 15 m entstehen. Die Fangstange wird dann auf das Dach versetzt. Auch für diesen Standort wurde die lokale Erdblitzdichte ermittelt. Sie ist in Abbildung 8.26 dargestellt.

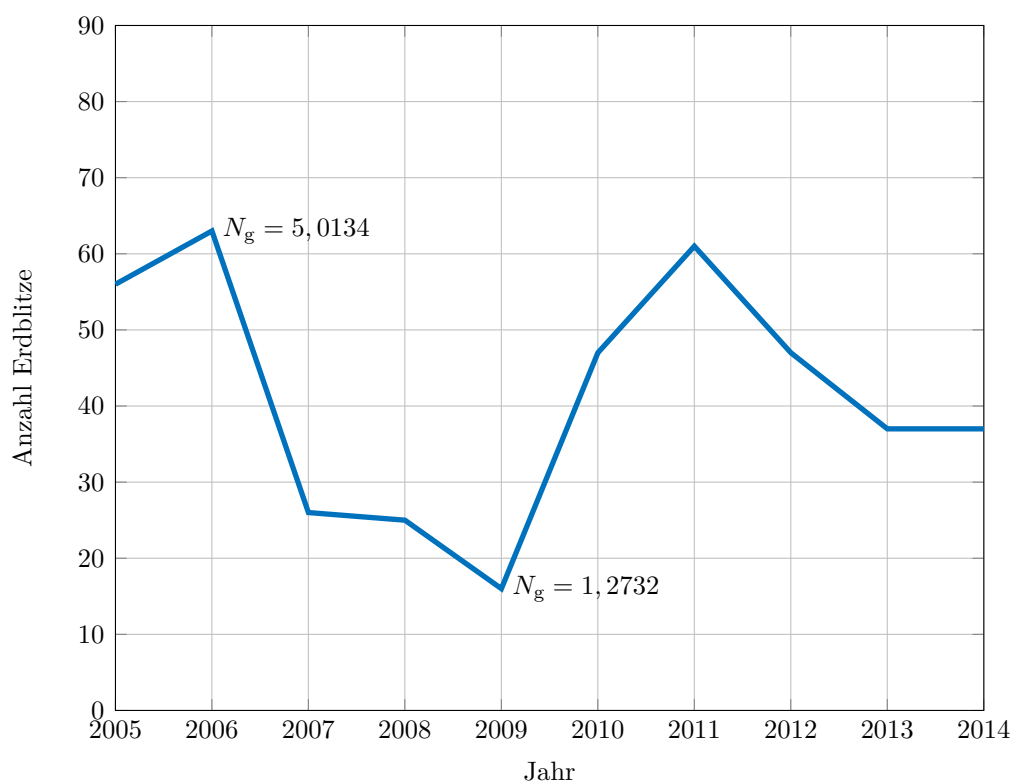


Abbildung 8.26.: Verlauf der Erdblitzdichte an dem Testfeld der Technischen Universität Darmstadt in Griesheim in den Jahren 2005 bis 2014

Da sich die Fangstange hier auf einem Freifeld befindet, ohne konkurrierende Gebäude, jedoch auf ebener Erde stehend, berechnet sich die Einfangfläche zu $A = 6035,0 \text{ m}^2$. Mit der örtlichen Erdblitzdichte sind somit 0,02 Blitzeinschläge pro Jahr an dieser Fangstange zu erwarten.

8.6. Messorte in Zusammenarbeit mit dem agrarmeteorologischen Messnetz Bayern

Das agrarmeteorologische Messnetz Bayern verfügt über 253 Standorte, an denen Messwarten aufgestellt sind, mit denen verschiedene Umweltparameter erfasst werden können. In Tabelle B.5 sind alle relevanten Daten zu allen Messeinrichtungen des Agrarmeteorologischen Messnetzes Bayern zusammengetragen.

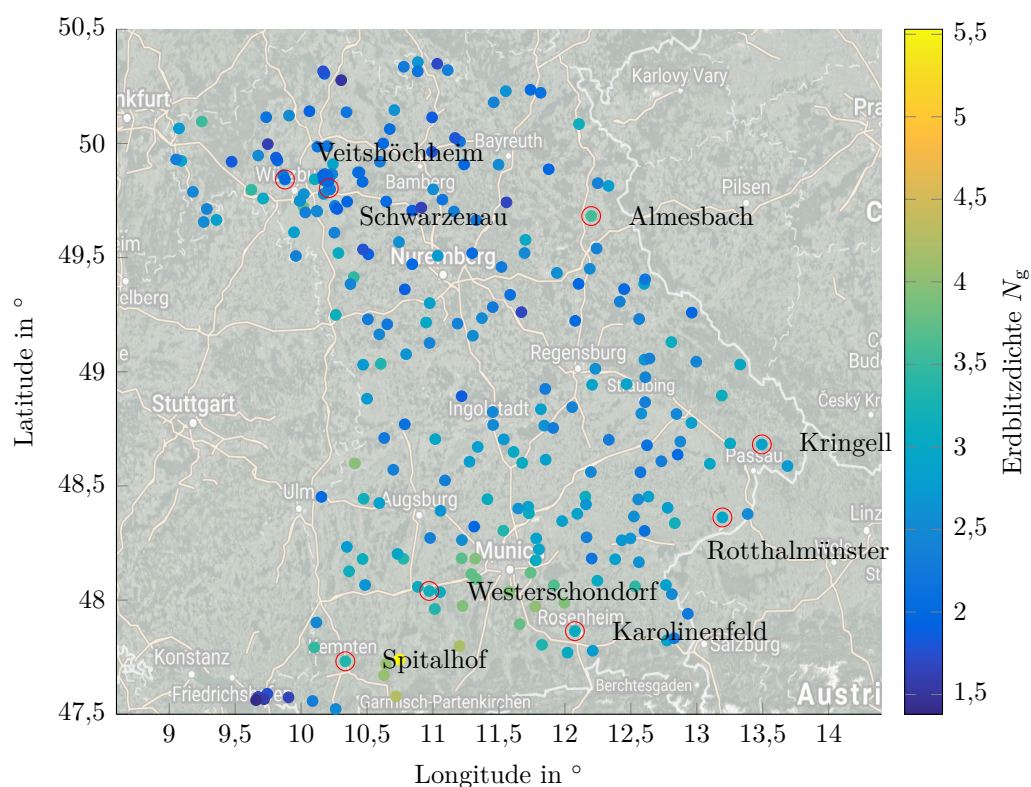


Abbildung 8.27.: Messnetz des Agrarmeteorologischen Messdienstes Bayern mit der Information der Erdblitzdichte an den Standorten in den Jahren zwischen 2000 bis 2015 mit Kennzeichnung der bereits mit Fangstangen ausgerüsteten Messorte

Die Erdblitzdichte wurde mit Hilfe eines Auswertekreises mit einem Radius von 2 km ermittelt. Damit ist sichergestellt, dass eine statistische Größe für den Standort je Jahr erhalten werden kann. Man erkennt hier teilweise sehr hohe Erdblitzdichten mit sehr hohen Streuungen der Blitzdichte, was im Wesentlichen bedeutet, dass diese Werte durch „Ausreißerjahre“ zu Stande kommen. Die Erdblitzdichte ist daher

nicht der entscheidende Faktor bei der Wahl eines geeigneten Standortes, sondern die Lage und ihre Umgebung. Das agrarmeteorologische Messnetz Bayern hat Standorte angeboten. Diese werden mit Fangstangen und Messeinrichtungen ausgestattet. Abbildung 8.27 zeigt alle 253 Standorte. Als Falschfarbenwert ist die Erdblickdichte für jeden Standort abzulesen. Die ausgewählten Standorte sind in der Karte rot umkreist.

9. Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein Lösungsweg erarbeitet und eingeschlagen, mit dem zukünftig die Einfangwirksamkeit von Blitzfangeinrichtungen untersucht und bewertet werden kann. Auslöser für dieses Thema sind neuartige unkonventionelle Blitzschutzkonzepte, die ihrerseits den Anspruch erheben, einen besseren Blitzschutz bereit zu stellen, als dies gewöhnliche Blitzfangstangen tun. Diesen Anspruch begründen die Hersteller dieser neuartigen Systeme mit der derzeit unbewiesenen Behauptung, dass die Fangeinrichtungen eine höhere Einfangwirksamkeit besitzen als gewöhnliche Fangstangen. Die Schwierigkeit bei diesem Thema besteht darin, dass zur Klärung dieser Behauptung ausschließlich Fangentladungen unter natürlichen Bedingungen untersucht werden müssen. In den letzten Jahren wurden viele Wege beschritten, um diesen Sachverhalt zu klären. Dabei haben Simulationen der Fangentladungsentstehung im Labor auf dem Computer oder sogar bei künstlich getriggerten Blitzen unterschiedliche Ergebnisse hervorgebracht. Eine Einigung oder Lösung bei der Frage nach der Wirksamkeit unkonventioneller Blitzschutzsysteme wurde hierdurch jedoch nicht herbeigeführt, da es immer wieder Beanstandungen hinsichtlich der Vorgehensweise und der Interpretation der Erkenntnisse gibt. Dabei hat sich die wissenschaftliche Fachwelt zu großen Teilen gegen den Einsatz dieser Technologie ausgesprochen, weswegen diese neuen Technologien normativ, mit einigen wenigen nationalen Ausnahmen, noch nicht sanktioniert wurden. Das jedoch hat die immer weitere Verbreitung bisher nur wenig behindert. Experten werden nach wie vor gezwungen, sich mit diesem Thema zu beschäftigen. Dabei ist noch nicht geklärt, ab wann es an einer Fangstange zu ersten Vorentladungen kommt, und wodurch diese beeinflusst werden, denn es ist auch denkbar, dass die Photonenstrahlung aus dem herannahenden Leitblitzkopf einen ganz natürlichen Einfluss auf die Bildung einer Fangentladung hat. Über das Profil von Entladungsmustern an einer Fangstange kann abgeschätzt werden, ob viele kleine Entladungen beispielsweise die Bildung größerer Entladungen verzögern. Die Hersteller der neuartigen Fangstangen

wären eigentlich in der Pflicht, auf wissenschaftliche und reproduzierbare Art und Weise nachzuweisen, dass ihre Technologie besser oder wenigstens gleich gut ist. Diese Arbeit zeigt, dass es mittlerweile möglich ist, kostengünstige und leistungsfähige Messeinrichtungen zu bauen, die das nötige Wissen über die Wirkungszusammenhänge zur Entstehung erfolgreicher Fangentladungen bereitstellen können. Das hier untersuchte Konzept sieht eine Messeinrichtung vor, die genau auf ihre Aufgabe hin optimiert ist. Sie ist in der Lage, den Hauptblitz und die Entstehung der Fangentladung zu messen. Dabei arbeitet die Messeinrichtung vollkommen autark und widersteht auch extremen Witterungsbedingungen. Im Labor hat sie bewiesen, dass sie mit sehr komplexen Feldverhältnissen und elektromagnetischen Beeinflussungen zurecht kommt und die in sie gesetzte Erwartung erfüllen kann. Für die Untersuchung wurden bereits zehn Fangstangen in Deutschland mit einem Messsystem ausgerüstet. Weitere Installationen sind in Vorbereitung und werden nach und nach installiert. Das Ziel sind 60 Messsysteme, um jährlich etwa 5 Blitzereignisse zu beobachten, denn die Erdblitzdichte in Deutschland ist vergleichsweise gering. Die Daten sollen dann mit modernsten Analyseverfahren, die aus der Teilentladungsmesstechnik (PRPD, 3CFRD, PSA) bekannt sind, untersucht werden.

Um aussichtsreiche Standorte auszurüsten, wurde eine noch neue Simulationsmethodik, das DEGM, aufgegriffen und erweitert. Die Erweiterung arbeitet mit einem vollkommen neuen Algorithmus, den es so noch nie gab. Der Algorithmus ist in der Lage, CAD-Modelle hochkomplexer Anlagen zu untersuchen, und das bei einer hohen Genauigkeit und bei überschaubarem Rechenaufwand. Aus diesem Grund wird die erweiterte Methodik auch als eDEGM bezeichnet. Die Ergebnisse dieser Simulation sind durch analytische Vergleichsberechnungen verifiziert. Mit ihr können nicht nur die Einfangwahrscheinlichkeiten auf Grundlage der anerkannten Regeln der Technik an Fangstangen präzise berechnet werden, sondern auch die gewichteten Fangflächen, jeder individuelle maximale Blitzkugelradius und jeder individuelle maximale Blitzstromscheitel von allen Objekten und ihren Einzelementen. Hieraus lassen sich dreidimensionale Darstellungen der Gebäude und ihrer Fangflächen, Fangvolumen, Histogramme über maximale Blitzstromscheitel und kumulierte Verteilungen anfertigen.

In der Vergangenheit wurde bereits vermutet, dass die unkonventionellen Fangeinrichtungen ihren wesentlichen Gewinn aus ihren exponierten Standorten ziehen. Die Arbeit nutzt das eDEGM zur Beschreibung der Standortqualität einer Fangstange. Es lässt sich damit erstmalig die Einfangfläche von hochkomplexen Gebäuden und

Gebäudeteilen bestimmen. Wichtige Einflussparameter des Aufstellortes wurden untersucht und zeigen große Abhängigkeiten vom Aufstellort.

Hierbei muss jedoch danach unterschieden werden, ob die Fangstange dem Schutz des Gebäudes dienen oder lediglich die Einfangwirksamkeit verbessert werden soll. Es hat sich gezeigt, dass Fangstangen auf hohen Gebäuden erst dann besonders wirksam werden, in dem Sinne, dass sie viele Blitze einfangen, wenn sie die Höhe des Gebäudes ausnutzen können, also am Rand oder an Ecken positioniert werden. Die Fangstange gewinnt auf diese Weise virtuell an Höhe. Die umliegende Bebauung ist zudem sehr wichtig, da sie das Einfangvolumen einer Fangstange maßgeblich beschneiden kann. Eine Fangstange mit hoher Einfangfläche ist daher sehr hoch und besitzt kaum konkurrierende Fangstangen in ihrer direkten Umgebung. Die umliegenden Gebäude sind hierbei nicht zwangsläufig gut geschützt, wenngleich die Einfangwirksamkeiten auch hier stark zurück gehen.

Ein nicht uninteressanter Nebenaspekt ist die Tatsache, dass die Höhe und der Aufstellort einer Fangstange die Verteilung der Blitzstromscheitel zu höheren Medianwerten verschiebt. Für zukünftige Betrachtungen sollte überprüft werden, ob die zugrunde gelegten Verteilungen nach CIGRÉ überdacht werden müssen. Neben klimatischen Ursachen könnte dieser Umstand eine weitere Erklärung für die unterschiedlichen Medianwerte der verschiedenen weltweiten Messeinrichtungen sein.

Ein sehr konservativer und optimaler Schutz wird nach wie vor durch die gängigen Normen definiert. Eine alternative Positionierung von Fangstangen beispielsweise durch das eDEGM kann im Einzelfall zu einem guten oder besseren Gebäudeschutz führen. Die aktuelle Blitzschutznorm ist dabei besser als die dort ausgewiesenen Einfangwirksamkeiten. Ein Schutzsystem, welches sich nur an diesen Einfangwirksamkeiten orientiert, spielt jedoch mit der Wahrscheinlichkeit und wird in bestimmten Bereichen eines Gebäudes höhere Blitzstromscheitel zulassen als von der Norm vorgegeben.

Neuartige Blitzfangstangen sind nicht nötig, um Blitzschutz zu optimieren. Sollte jedoch die Einfangwirksamkeit von Fangeinrichtungen in die Blitzschutzplanung einfließen, müssen die Einflussparameter unter realistischen Bedingungen untersucht werden. Dieses Ziel kann mit dem in dieser Arbeit vorgestellten und in seinen Anfängen bereits realisierten Messkonzept, erreicht werden.

Anhang

A. Informationen zur Referenzmesstechnik

Tabelle A.1.: Technische Daten der eingesetzten Rogowskispulen der Firma PEM im Hochstromkreis an der TU Darmstadt

Typ	CWT30	CWT150	CWT600	CWT1500
Max. Stromscheitel	6 kA	30 kA	120 kA	300 kA
Max. Stromsteilheit	40 kA μs^{-1}	40 kA μs^{-1}	40 kA μs^{-1}	40 kA μs^{-1}
Sensitivität	1 mV A ⁻¹	0,2 mV A ⁻¹	0,05 mV A ⁻¹	0,02 mV A ⁻¹
Maximales Rauschen	5 mV _{pk-pk}	3 mV _{pk-pk}	3 mV _{pk-pk}	3 mV _{pk-pk}
Untere Grenzfrequenz	0,6 Hz	0,2 Hz	0,05 Hz	0,03 Hz
Obere Grenzfrequenz	16 MHz	16 MHz	16 MHz	16 MHz
Genauigkeit	±1 %	±1 %	±1 %	±1 %

Tabelle A.2.: Technische Daten des eingesetzten Oszilloskops (TDS3034) der Firma Tektronix im Hochstromkreis an der TU Darmstadt

Typ	TDS3034
Bandbreite	300 MHz
Maximale Abtastrate	2,5 GS s ⁻¹
Maximale Aufzeichnungslänge	10,000 S
Auflösung	9 Bit
Genauigkeit	±2 %
Maximale Eingangsspannung	150 V
Eingangsimpedanz	1 M Ω und 13 pF oder 50 Ω
Kopplung	AC oder DC

Tabelle A.3.: Technische Daten der eingesetzten Wandler der Firma Pearson im Hochstromkreis der Fa. DEHN + SÖHNE in Neumarkt (Oberpfalz)

Typ	Model 4427	Model 1423
Max. Stromsichel	500 kA	500 kA
Sensitivität	1 mV A ⁻¹	1 mV A ⁻¹
Untere Grenzfrequenz	1 Hz	1 Hz
Obere Grenzfrequenz	1,2 MHz	1,2 MHz
Genauigkeit	±1 %	±1 %

Tabelle A.4.: Technische Daten des eingesetzten Oszilloskops (TDS7054) der Firma Tektronix im Hochstromkreis der Fa. DEHN + SÖHNE in Neumarkt (Oberpfalz)

Typ	TDS7054
Bandbreite	500 MHz
Maximale Abtastrate	5 GS s ⁻¹
Maximale Aufzeichnungslänge	400,000 S
Auflösung	8 Bit
Genauigkeit	±1 %
Maximale Eingangsspannung	150 V
Eingangsimpedanz	1 MΩ und 13 pF oder 50 Ω
Kopplung	AC oder DC

B. Weiterführende Informationen zur LPDMU

B.1. Integrator

Für den Integrator werden die Bauteile aus Tabelle B.1 verwendet.

Tabelle B.1.: Bauteilgrößen für den projektierten Integrator

Bezeichnung	Wert
R_0	7,58 k Ω
R_1	680 k Ω
R_2	8,5 k Ω
C_1	15 nF
C_2	470 μ F
Operationsverstärker	OPA627

B.2. Bandpass

Für den Bandpass werden die Bauteile aus Tabelle B.2 verwendet.

Tabelle B.2.: Bauteilgrößen für den projektierten Bandpass mit Dämpfungsglied

Bauteil	Wert
R_D	120 Ω
C_P	200 pF
C_S	3,1 nF
L_P	15,6 μ H
L_S	1,1 μ H

B.3. Datenerfassung

Tabelle B.3.: Einstellbare Parameter für das Messsystem LPDMU

	Parameter	Werte	Bedeutung
HFCT	ADC_CHANNEL0_START_ADDR	0x0	Startadresse im SDRAM
	ADC_CHANNEL0_END_ADDR	0x2B64660	Stoppadresse im SDRAM
	ADC_CHANNEL0_POST_TRIGGER_LEN	0x632EA0	Samples nach Trigger
	ADC_CHANNEL0_TRIGGER_LEVEL_HIGH	0x0	pos. Triggerlevel (aus)
	ADC_CHANNEL0_TRIGGER_LEVEL_LOW	0x0	neg. Triggerlevel (aus)
Rogowskispule	ADC_CHANNEL1_START_ADDR	0x2B64662	Startadresse im SDRAM
	ADC_CHANNEL1_END_ADDR	0x700E862	Stoppadresse im SDRAM
	ADC_CHANNEL1_POST_TRIGGER_LEN	0x3938700	Samples nach Trigger
	ADC_CHANNEL1_TRIGGER_LEVEL_HIGH	0x8274	pos. Triggerlevel 10 mV
	ADC_CHANNEL1_TRIGGER_LEVEL_LOW	0x8110	neg. Triggerlevel −10 mV

Tabelle B.4.: Einstellbare Parameter für das Messsystem LPDMU

SMS-Befehl	Erklärung
„TimeGet“	Hier werden das Datum und die Uhrzeit zurück gesendet.
„TimeSet“	Hier wird die Messeinrichtung veranlasst, sich eine neue Systemzeit aus dem GSM-Netz zu holen.
„ParameterGet“	Es werden die aktuellen Parameter zurück gegeben.
„ParameterSet, Param1: Start-, Stoppadresse, Post-Trigger, High-, Low-Triggerlevel Param2: Start-, Stoppadresse, Post-Trigger, High-, Low-Triggerlevel“	Hier können alle Parameter aus Tabelle B.3 angepasst werden. Die Übermittlung kann in dezimaler oder hexadezimaler Form erfolgen.
„FlashDir“	Dieser Befehl sendet eine Übersicht aller auf der SDMC-Karte befindlichen Daten.
„ReadData, Server-Adresse, Benutzername, Passwort, Pfad, Dateiname, Offset“	Mit diesem Befehl kann das Hochladen einer Datei auf einen Server veranlasst werden. Da die Dateien fast 128 MByte groß sind und die Datenrate recht gering ist, nimmt das Senden einer Messdatei beinahe einen Tag in Anspruch. In Anbetracht der erwarteten Anzahl von Messungen ist dies unproblematisch. Bei einem Verbindungsabbruch kann das Hochladen der Datei über einen Offset fortgesetzt werden, ohne dass die Datei erneut in vollem Umfang heruntergeladen werden muss.

B.4. Weitere Installationsstandorte der LPDMU

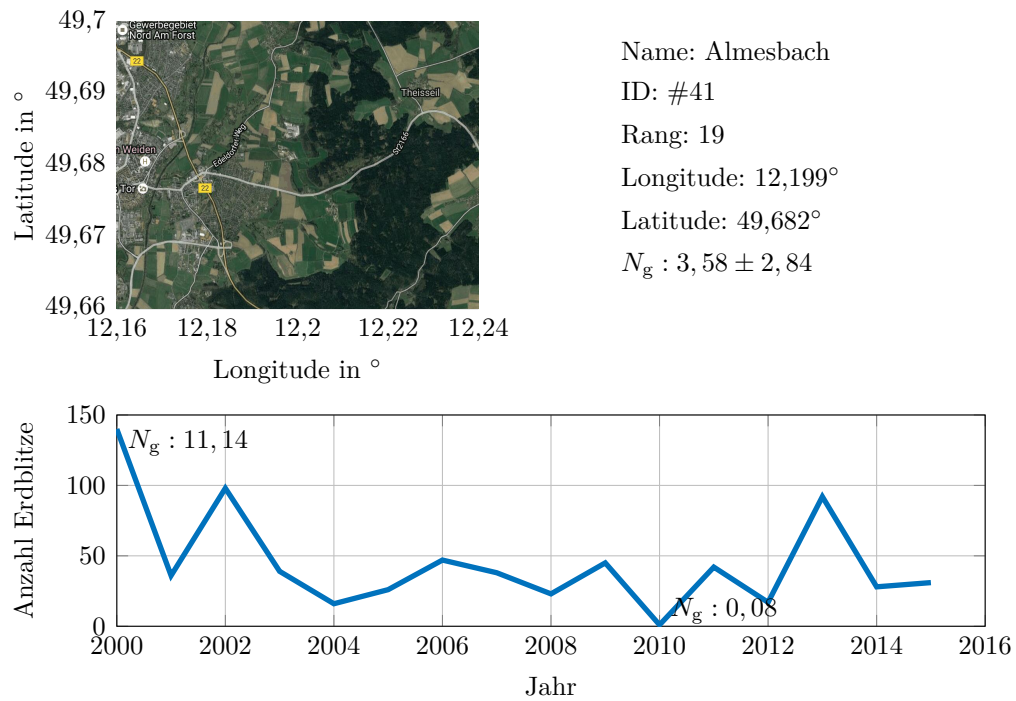


Abbildung B.1.: Standort Almesbach (agrarmeteorologischer Messdienst Bayern)

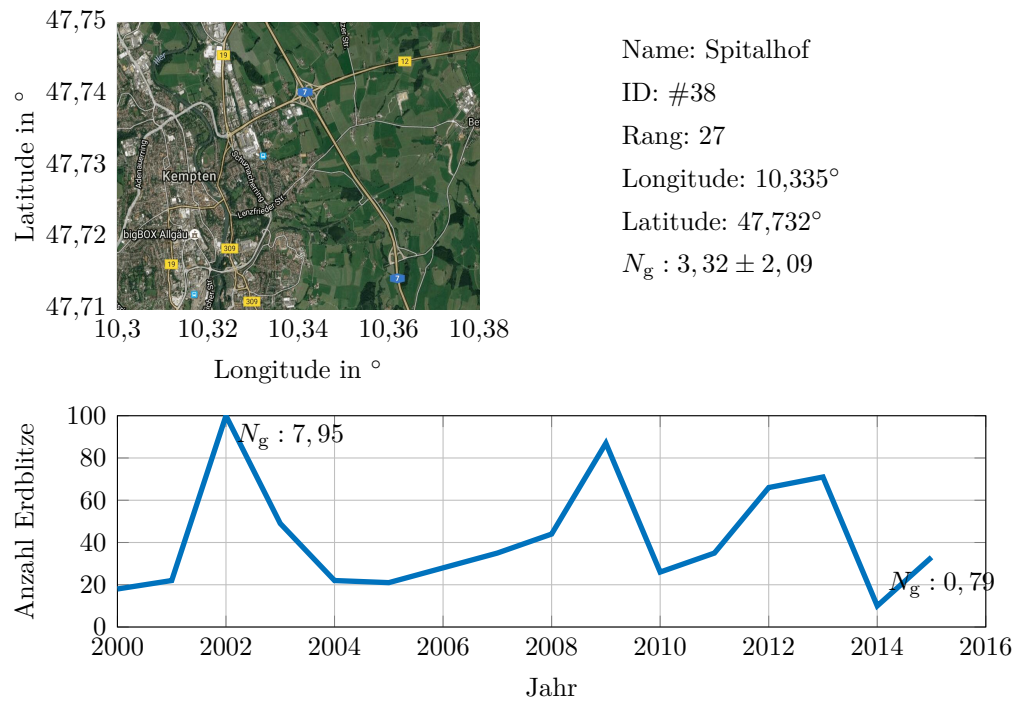


Abbildung B.2.: Standort Spitalhof (agrarmeteorologischer Messdienst Bayern)

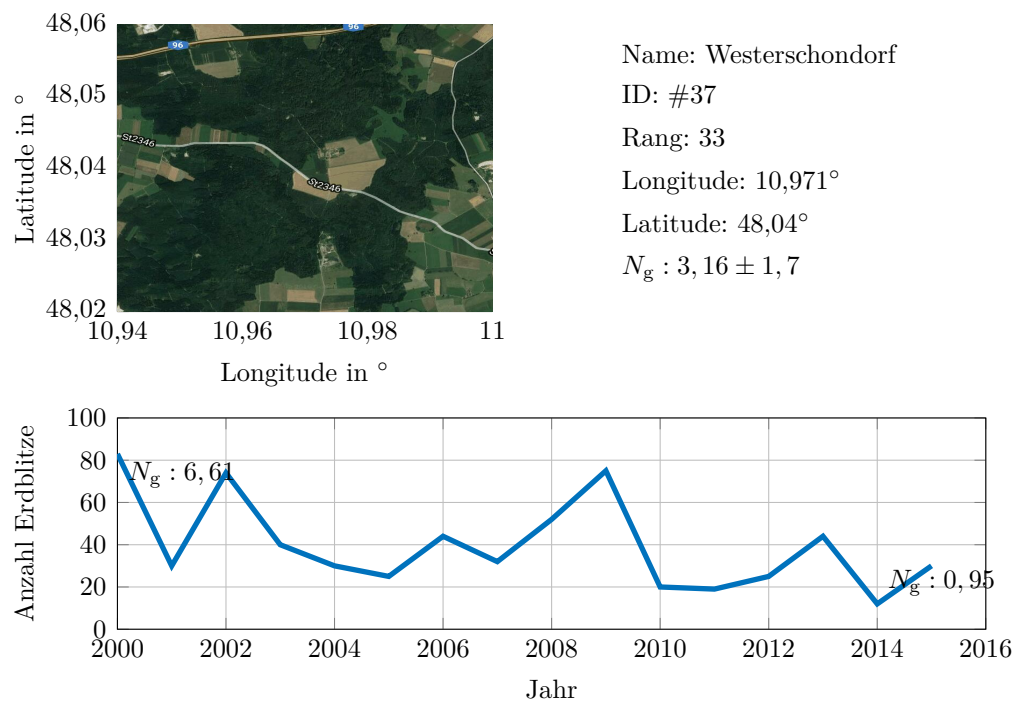


Abbildung B.3.: Standort Westerschondorf (agrarmeteorologischer Messdienst Bayern)

B. Weiterführende Informationen zur LPDMU

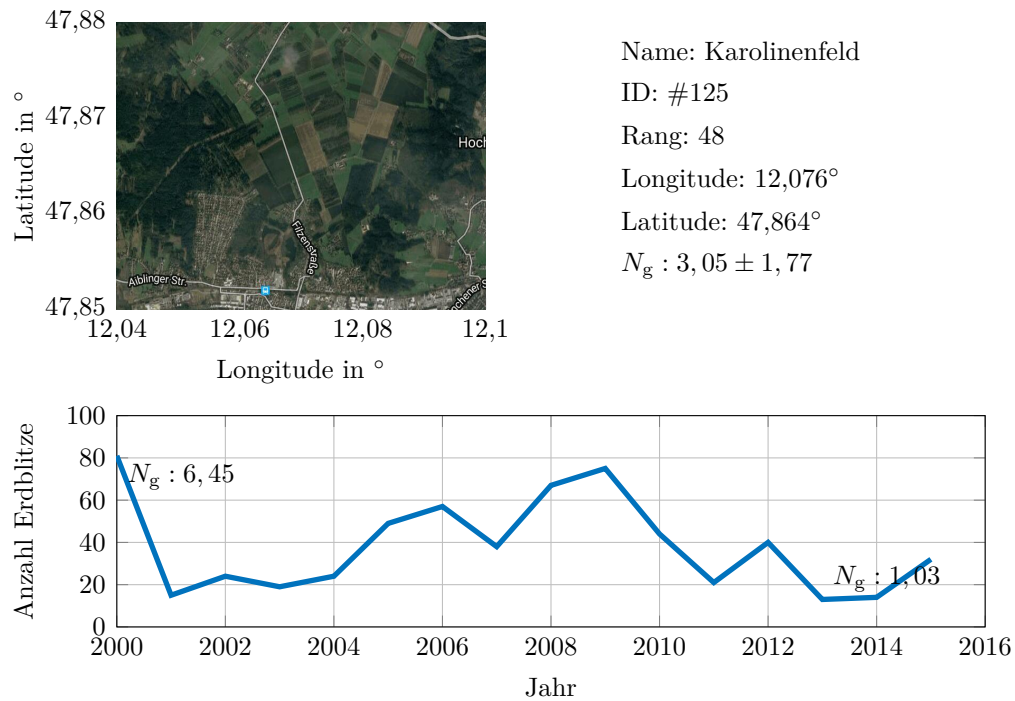


Abbildung B.4.: Standort Karolinenfeld (agrometerologischer Messdienst Bayern)

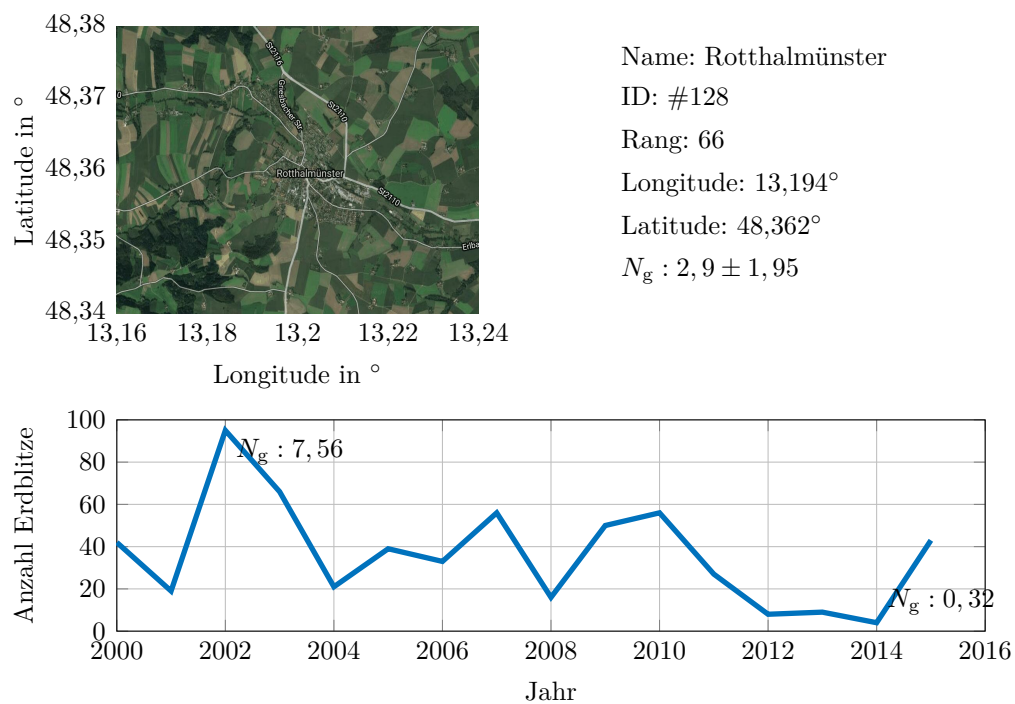


Abbildung B.5.: Standort Rotthalmünster (agrometerologischer Messdienst Bayern)

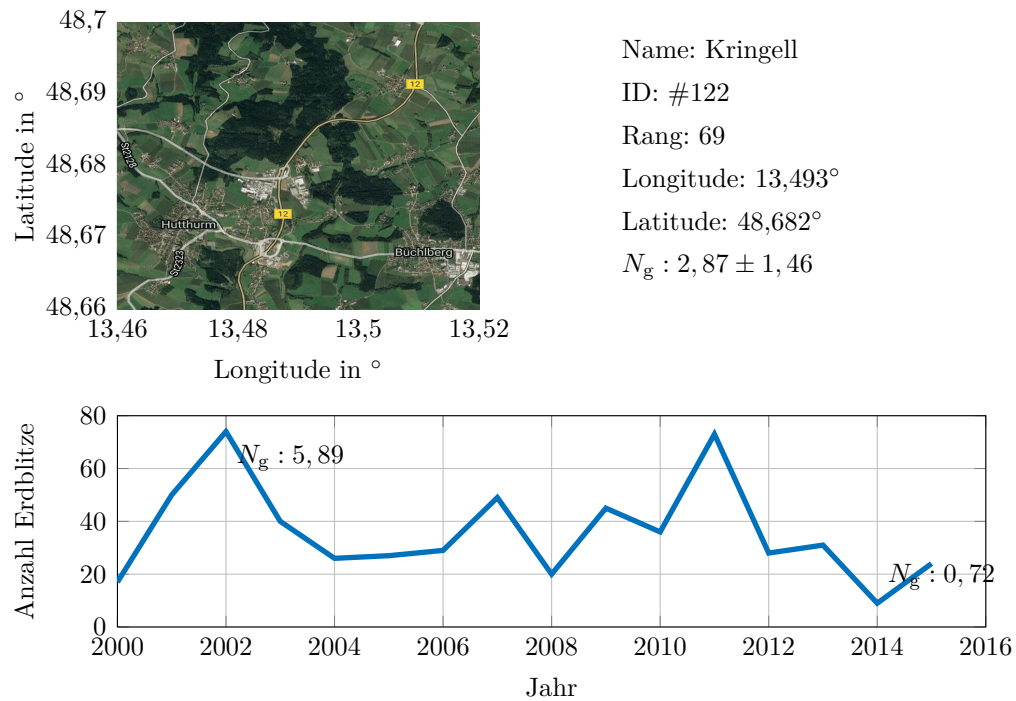


Abbildung B.6.: Standort Kringell (agrarmeteorologischer Messdienst Bayern)

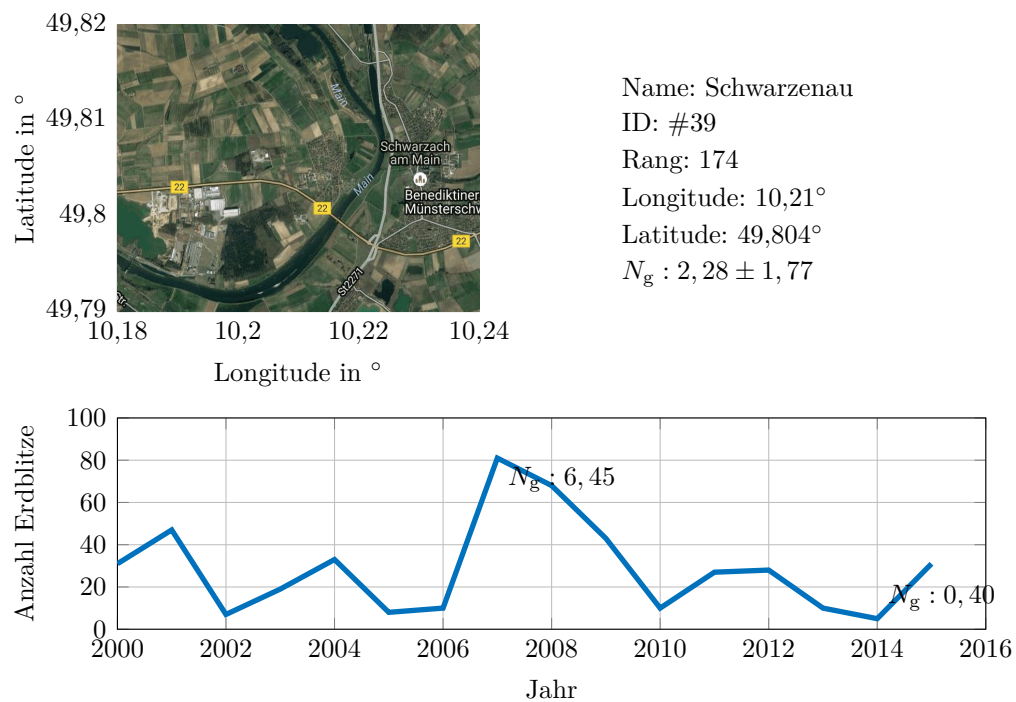


Abbildung B.7.: Standort Schwarzenau (agrarmeteorologischer Messdienst Bayern)

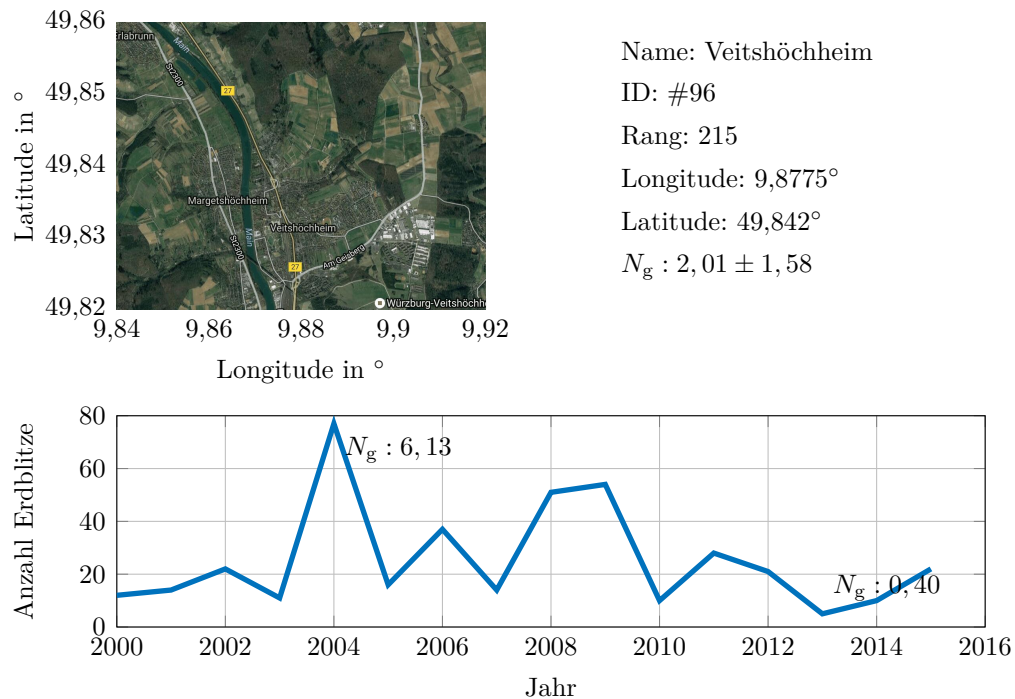


Abbildung B.8.: Standort Veitshöchheim (agrometeorologischer Messdienst Bayern)

B.5. Erdblitzdichte an den Standorten des agrometeorologischen Messnetz Bayern

Tabelle B.5.: BLIDS-Daten zu den agrometeorologischen Messstationen in Bayern in den Jahren 2000 bis 2015

Rang	ID	Standort	Latitude	Longitude	Erdblitzdichte	Abweichung
1	#630	Bernbeuren	10,746°	47,74°	5,526	3,956
2	#679	Schwangau-Horn	10,719°	47,578°	4,247	2,731
3	#634	Eberfing	11,202°	47,799°	4,213	2,788
4	#674	Marktoberdorf	10,644°	47,72°	4,063	2,505
5	#680	Seeg	10,628°	47,671°	4,049	2,665
6	#628	Aying	11,776°	47,972°	4,009	2,946
7	#32	Frauenriedhausen	10,407°	48,599°	3,964	3,951
8	#627	Aßling	11,996°	47,988°	3,919	2,254
9	#631	Deisenhofen	11,578°	48,037°	3,919	2,804
10	#6	Roggenstein	11,321°	48,182°	3,914	2,24
11	#80	Rothendorf	11,224°	47,974°	3,914	2,788

B.5. Erdblitzdichte an den Standorten des agrarmeteorologischen Messnetz Bayern

Rang	ID	Standort	Latitude	Longitude	Erdblitzdichte	Abweichung
12	#807	WB Eibelstadt	10,017°	49,723°	3,765	2,912
13	#131	Otterfing	11,657°	47,895°	3,75	2,521
14	#72	Gut Hüll	11,326°	48,093°	3,735	2,363
15	#75	Haar	11,74°	48,12°	3,725	1,95
16	#638	Gilching	11,29°	48,114°	3,715	2,613
17	#5	Puch	11,217°	48,183°	3,7	2,655
18	#43	Osterseeon	11,917°	48,065°	3,646	2,154
19	#41	Almesbach	12,199°	49,682°	3,576	2,841
20	#130	Schöllkrippen	9,247°	50,096°	3,516	2,618
21	#670	Altusried	10,1°	47,793°	3,447	2,537
22	#308	Homburg Kallmuth	9,6227°	49,797°	3,447	3,301
23	#133	Anfelden	10,399°	49,414°	3,427	2,26
24	#2	Schönharting	12,532°	48,06°	3,412	1,813
25	#59	Schwabmünchen	10,776°	48,181°	3,352	2,017
26	#632	Dießen am Ammersee	11,014°	47,961°	3,327	3,039
27	#38	Spitalhof	10,335°	47,732°	3,317	2,088
28	#639	Haimhausen	11,533°	48,304°	3,307	2,021
29	#643	Miesbach	11,826°	47,804°	3,293	1,756
30	#609	Wassertrüdingen	10,604°	49,035°	3,288	2,62
31	#102	Haldenwang	10,474°	48,444°	3,168	2,014
32	#49	Frieding	12,833°	48,337°	3,163	2,184
33	#37	Westerschondorf	10,971°	48,04°	3,158	1,7
34	#54	Mittelstetten	10,263°	49,249°	3,153	3,187
35	#95	Braunersgrün	12,107°	50,085°	3,128	2,167
36	#672	Breitenbrunn	10,364°	48,126°	3,128	1,578
37	#137	Kirchheim in Schw,	10,466°	48,18°	3,113	1,647
38	#625	Vilsheim	12,155°	48,453°	3,113	1,88
39	#135	Kirchberg i,W,	13,19°	48,896°	3,099	2,687
40	#652	Utting am Ammersee	11,053°	48,035°	3,099	2,036
41	#127	Allmannsdorf	12,807°	49,13°	3,089	1,769
42	#320	Pulling	11,727°	48,38°	3,084	1,512
43	#7	Seligenstadt	10,103°	49,843°	3,084	2,126
44	#139	Grub	11,779°	48,174°	3,059	1,737
45	#61	Landsberg	10,885°	48,058°	3,059	1,501
46	#40	Hüll	11,676°	48,601°	3,049	2,778
47	#136	Jetzendorf	11,412°	48,442°	3,054	2,136
48	#125	Karolinenfeld	12,076°	47,864°	3,049	1,766
49	#26	Neuherberg	10,283°	49,52°	3,054	2,362
50	#69	Stadelhof	11,611°	48,649°	3,029	2,178
51	#629	Bad Feilnbach	12,02°	47,77°	3,019	1,955
52	#613	Eging am See	13,253°	48,686°	3,024	2,204

B. Weiterführende Informationen zur LPDMU

Rang	ID	Standort	Latitude	Longitude	Erdblitzdichte	Abweichung
53	#134	Bergham	12,246°	48,085°	3,009	1,685
54	#86	Helmstadt	9,7119°	49,759°	3,009	3,033
55	#1	Edelsfeld	11,701°	49,578°	3,004	2,354
56	#55	Obersteinbach	10,948°	49,216°	2,979	2,4
57	#617	Lindberg	13,329°	49,032°	2,969	2,075
58	#142	Aldersbach	13,099°	48,597°	2,959	2,017
59	#611	Aholfing	12,468°	48,946°	2,934	1,689
60	#636	Finsing	11,803°	48,222°	2,934	1,243
61	#35	Burgheim	11,017°	48,705°	2,919	2,88
62	#678	Schwabmuenchen	10,731°	48,202°	2,924	1,901
63	#108	Wadenbrunn	10,241°	49,91°	2,915	1,952
64	#17	Köfering	12,206°	48,943°	2,9	1,971
65	#644		12,773°	47,823°	2,9	1,345
66	#128	Rotthalmünster	13,194°	48,362°	2,905	1,95
67	#8	Freising	11,722°	48,409°	2,88	1,532
68	#688	Großostheim,	9,0917°	49,924°	2,88	2,181
69	#122	Kringell	13,493°	48,682°	2,875	1,465
70	#118	Engersdorf	12,633°	48,453°	2,86	1,909
71	#649	Steinkirchen	12,094°	48,378°	2,865	1,39
72	#684	Zusmarshausen	10,593°	48,425°	2,85	2,236
73	#114	Eichenried	11,783°	48,27°	2,84	1,13
74	#619	Moos	12,959°	48,776°	2,825	1,973
75	#124	Sandharlanden	11,818°	48,836°	2,835	2,085
76	#126	Schattenhof	10,975°	49,301°	2,825	2,514
77	#13	Dietrichsdorf	11,854°	48,615°	2,82	1,688
78	#30	Euerhausen	9,946°	49,611°	2,82	1,642
79	#45	Frankendorf	11,979°	48,346°	2,82	1,437
80	#651	Tittmoning	12,766°	48,066°	2,82	1,95
81	#84	Heppdiel	9,3581°	49,665°	2,805	1,686
82	#641	Jettenbach	12,381°	48,179°	2,8	1,68
83	#98	Karlshuld	11,339°	48,671°	2,795	1,721
84	#11	Edelshausen	11,277°	48,606°	2,79	2,182
85	#66	Wullnhof	12,601°	49,385°	2,79	1,368
86	#667	Plößberg	12,331°	49,814°	2,78	2,34
87	#29	Randersacker	9,99°	49,748°	2,775	2,247
88	#612	Eggenfelden	12,779°	48,404°	2,77	1,901
89	#34	Buch	11,036°	49,508°	2,755	2,416
90	#816	WB Wasserlos	9,0742°	50,066°	2,76	2,332
91	#62	Reschenberg	10,347°	48,233°	2,745	1,187
92	#648	Samerberg	12,211°	47,778°	2,745	1,875
93	#23	Frankenhofen	10,47°	49,031°	2,726	2,651

B.5. Erdblitzdichte an den Standorten des agrarmeteorologischen Messnetz Bayern

Rang	ID	Standort	Latitude	Longitude	Erdblitzdichte	Abweichung
94	#60	Wallerstein	10,5°	48,882°	2,731	1,618
95	#140	Kinzesberg	13,688°	48,587°	2,716	1,515
96	#71	Bürg	12,16°	48,419°	2,701	1,463
97	#36	Baumannshof	11,536°	48,704°	2,691	2,055
98	#626	Ampfing	12,431°	48,262°	2,671	1,91
99	#132	Eiserszell	12,603°	49,053°	2,656	1,648
100	#74	Lochheim	12,497°	48,27°	2,646	1,376
101	#655	Meeder	10,885°	50,356°	2,646	1,321
102	#813	WB Sulzfeld Tal	10,122°	49,702°	2,646	2,614
103	#673	Dasing	11,057°	48,391°	2,641	1,965
104	#676	Mindelheim	10,485°	48,066°	2,636	1,831
105	#658	Presseck	11,552°	50,229°	2,636	3,196
106	#52	Windsfeld	10,796°	49,077°	2,636	1,72
107	#692	Pfarrweisach	10,707°	50,146°	2,626	1,96
108	#302	Randersacker Sonnenstuhl	9,9924°	49,75°	2,626	1,978
109	#621	Siegenburg	11,844°	48,764°	2,626	2,118
110	#110	Viehhausen	11,646°	48,401°	2,606	1,394
111	#77	Forsting	12,561°	48,166°	2,601	1,45
112	#83	Gerbrunn	10,021°	49,778°	2,596	2,684
113	#12	Piering	12,579°	48,817°	2,591	1,747
114	#18	Sarching	12,231°	49,013°	2,586	1,699
115	#65	Hiltersdorf	11,939°	49,433°	2,581	1,547
116	#28	Albertshofen	10,171°	49,779°	2,571	2,072
117	#610	Wilhelmsdorf	10,742°	49,568°	2,571	2,247
118	#653	Altendorf	11,001°	49,799°	2,561	2,907
119	#4	Dürabuch	11,219°	48,263°	2,546	1,303
120	#645	Neumarkt-Sankt Veit	12,523°	48,366°	2,551	1,908
121	#57	Federhof	11,302°	49,158°	2,542	2,21
122	#113	Mistelbach	11,497°	49,907°	2,542	2,252
123	#685	Amorbach	9,2619°	49,656°	2,527	1,986
124	#689	Hammelburg	9,9083°	50,122°	2,517	1,472
125	#20	Röckersbühl	11,371°	49,235°	2,517	1,795
126	#121	Bärnau	13,386°	48,377°	2,512	1,777
127	#615	Gangkofen	12,556°	48,441°	2,512	1,832
128	#663	Nabburg	12,189°	49,451°	2,512	3,254
129	#44	Steinfeld	9,6746°	49,947°	2,507	2,627
130	#635	Edelsfeld	11,694°	49,52°	2,502	2,116
131	#640	Ingolstadt	11,455°	48,767°	2,497	1,86
132	#117	Nilling	12,811°	48,026°	2,502	1,884
133	#681	Sonthofen	10,262°	47,523°	2,497	1,377
134	#801	WB Sulzfeld	10,119°	49,704°	2,492	2,453

B. Weiterführende Informationen zur LPDMU

Rang	ID	Standort	Latitude	Longitude	Erdblitzdichte	Abweichung
135	#14	Neusling	12,875°	48,694°	2,482	2,089
136	#603	Bechhofen	10,593°	49,164°	2,472	1,68
137	#106	Hepberg	11,453°	48,824°	2,467	1,451
138	#103	Lautrach	10,116°	47,902°	2,472	1,666
139	#604	Colmberg	10,374°	49,384°	2,457	2,4
140	#48	Schönbrunn	12,197°	48,561°	2,452	1,287
141	#3	Uttenkofen	12,846°	48,815°	2,447	1,345
142	#804	WB Klingenberg	9,1799°	49,788°	2,447	2,088
143	#802	WB Rödelsee	10,256°	49,727°	2,432	1,678
144	#607	Pleinfeld	10,974°	49,126°	2,422	1,68
145	#88	Bürgstadt	9,285°	49,713°	2,412	1,489
146	#46	Kaltenberg	12,055°	48,845°	2,407	1,522
147	#42	Steinach	12,61°	48,976°	2,407	1,346
148	#623	Teisnach	12,996°	49,044°	2,407	1,328
149	#316	Gaibach Kapellenberg	10,236°	49,866°	2,397	1,525
150	#91	Poppenholz	11,46°	50,18°	2,402	2,032
151	#63	Söllitz	12,24°	49,54°	2,402	2,423
152	#817	WB Weinparadies	10,252°	49,609°	2,387	1,869
153	#33	Kitzenried	12,416°	49,307°	2,362	1,685
154	#67	Konnernsreuth	12,249°	49,826°	2,357	0,9531
155	#608	Rothsee bei Allersberg	11,186°	49,211°	2,362	2,054
156	#120	Pösing	12,563°	49,231°	2,353	1,346
157	#622	Stallwang	12,641°	49,058°	2,353	1,824
158	#811	WB Sommerhausen	10,032°	49,698°	2,353	1,76
159	#683	Wertingen	10,699°	48,571°	2,348	1,594
160	#138	Dietzhof	11,159°	49,702°	2,338	1,727
161	#810	WB Röttingen	9,9606°	49,507°	2,343	1,756
162	#100	Ainertshofen	11,091°	48,524°	2,323	1,374
163	#633	Dorfen	12,164°	48,275°	2,323	1,458
164	#675	Mering	10,978°	48,272°	2,318	1,178
165	#81	Großostheim	9,0522°	49,93°	2,308	1,522
166	#656	Neustadt bei Coburg	11,112°	50,321°	2,308	1,282
167	#300	Straubing	12,608°	48,867°	2,313	2,015
168	#693	Schwarzach am Main	10,22°	49,799°	2,303	1,796
169	#691	Oberaurach	10,597°	49,92°	2,288	1,538
170	#677	Oberstaußen	10,087°	47,558°	2,288	1,296
171	#16	Steinbeßen	12,731°	48,608°	2,293	1,998
172	#659	Bad Rodach	10,779°	50,336°	2,278	1,816
173	#47	Feistenaich	12,333°	48,702°	2,283	1,59
174	#39	Schwarzenau	10,21°	49,804°	2,278	1,774
175	#15	Eschenhart	11,911°	48,754°	2,273	1,885

B.5. Erdblitzdichte an den Standorten des agrarmeteorologischen Messnetz Bayern

Rang	ID	Standort	Latitude	Longitude	Erdblitzdichte	Abweichung
176	#605	Herrieden	10,506°	49,23°	2,273	1,743
177	#616	Kelheim	11,851°	48,925°	2,268	1,475
178	#665	Neumarkt	11,453°	49,283°	2,263	1,624
179	#129	See	11,519°	49,459°	2,258	1,62
180	#671	Bissingen	10,63°	48,71°	2,233	1,497
181	#93	Hiltpoltstein	11,327°	49,664°	2,233	1,222
182	#642	Laufen	12,932°	47,94°	2,228	1,43
183	#650	Teisendorf	12,828°	47,833°	2,218	1,172
184	#814	WB Thüngersheim	9,8635°	49,861°	2,218	1,63
185	#305	Escherndorf Lump	10,18°	49,866°	2,208	1,81
186	#669	Treffelstein	12,608°	49,405°	2,198	0,9832
187	#21	Triesdorf	10,653°	49,208°	2,203	1,312
188	#312	Karlbürg Roßtal	10,2°	49,988°	2,183	1,634
189	#662	Stadelhofen	11,204°	50,008°	2,183	1,467
190	#116	Bammersdorf	11,071°	49,754°	2,173	1,911
191	#27	Ebertshausen	10,344°	50,137°	2,168	2,39
192	#618	Marklkofen	12,573°	48,56°	2,173	1,892
193	#78	Asen	12,203°	48,182°	2,164	1,41
194	#92	Birkenmoor	10,884°	50,316°	2,164	1,853
195	#318	Escherndorf Tal	10,197°	49,862°	2,149	1,586
196	#307	Handthal Stollberg	10,431°	49,873°	2,149	1,57
197	#304	Iphofen Kronsberg	10,263°	49,717°	2,154	1,229
198	#687	Gräfendorf	9,7353°	50,115°	2,139	1,937
199	#31	Ettleben	10,124°	49,986°	2,134	1,942
200	#620	Pilsting	12,622°	48,678°	2,119	1,178
201	#646	Pleiskirchen	12,604°	48,303°	2,114	1,168
202	#25	Hartenhof	11,585°	49,337°	2,104	1,151
203	#123	Markersreuth	11,816°	50,222°	2,104	1,163
204	#99	Neuhof	10,786°	48,77°	2,099	1,131
205	#109	Köslau	10,672°	50,063°	2,064	1,656
206	#803	WB Handthal	10,442°	49,873°	2,054	1,551
207	#614	Eichendorf	12,855°	48,637°	2,029	1,456
208	#606	Lauf an der Pegnitz	11,297°	49,519°	2,034	1,364
209	#661	Schlüsselfeld	10,645°	49,746°	2,029	1,74
210	#654	Helmbrechts	11,739°	50,235°	2,019	1,466
211	#111	Kleingressingen	10,466°	49,832°	2,019	1,899
212	#303	Nordheim Kreuzberg	10,2°	49,857°	2,019	1,497
213	#668	Teublitz	12,078°	49,223°	2,019	1,094
214	#58	Weißingen	10,154°	48,452°	2,019	0,7882
215	#96	Veitshöchheim	9,8775°	49,842°	2,009	1,584
216	#805	WB Himmelstadt	9,8204°	49,926°	2,014	1,73

B. Weiterführende Informationen zur LPDMU

Rang	ID	Standort	Latitude	Longitude	Erdblitzdichte	Abweichung
217	#56	Greimersdorf	10,842°	49,471°	2,004	1,589
218	#306	Ziegelanger Ölschnabel	10,622°	50°	1,999	1,286
219	#317	Köhler Fürstenberg	10,171°	49,84°	1,994	1,433
220	#97	Sommerach	10,209°	49,835°	1,994	1,499
221	#666	Neunburg vorm Wald	12,449°	49,362°	1,979	1,193
222	#89	Aufseß	11,236°	49,908°	1,975	0,8891
223	#68	Großberghofen	11,312°	48,322°	1,975	0,9647
224	#107	Irrenlohe	12,104°	49,385°	1,97	1,557
225	#141	Kemnath	11,877°	49,887°	1,97	1,32
226	#664		12,962°	49,259°	1,96	0,8624
227	#806	WB Castell	10,349°	49,745°	1,965	1,406
228	#319	Escherndorf Berg	10,164°	49,86°	1,935	1,399
229	#809	WB Ramsthal	10,063°	50,141°	1,92	1,12
230	#51	Iphofen	10,274°	49,713°	1,895	1,042
231	#808	WB Ipsheim	10,509°	49,515°	1,89	1,177
232	#24	Bonnhof	10,786°	49,361°	1,875	1,317
233	#812	WB Stetten	9,8094°	49,938°	1,87	1,603
234	#686	Bad Neustadt	10,177°	50,305°	1,855	1,076
235	#104	Höchstadt a,d, Aisch	10,842°	49,706°	1,86	1,168
236	#10	Häringhof	11,217°	48,893°	1,845	1,406
237	#94	Bad Staffelstein	10,993°	50,114°	1,835	1,095
238	#690	Hasloch am Main	9,4733°	49,92°	1,83	1,532
239	#90	Wiesengiech	10,992°	49,963°	1,8	0,9049
240	#112	Großziegenfeld	11,167°	50,024°	1,786	0,7655
241	#85	Hohenroth	10,167°	50,316°	1,761	1,099
242	#53	Kaubenheim	10,469°	49,536°	1,761	1,288
243	#301	Schlachters	9,7441°	47,59°	1,736	1,442
244	#660	Rödental	11,032°	50,349°	1,696	1,437
245	#19	Sommertshof	11,67°	49,261°	1,676	0,9113
246	#657	Pegnitz	11,557°	49,742°	1,656	0,7706
247	#315	Schönau	9,6756°	47,576°	1,626	0,942
248	#682	Weiler-Simmerberg	9,905°	47,574°	1,631	0,5436
249	#601	Adelsdorf	10,911°	49,719°	1,616	1,055
250	#313	Gambach Kalbenstein	9,7476°	49,997°	1,601	1,413
251	#314	Streitelsfingen	9,7191°	47,566°	1,562	1,163
252	#87	Maria-Bildhausen	10,304°	50,277°	1,497	1,089
253	#309	Schwand	9,6581°	47,562°	1,383	0,8526

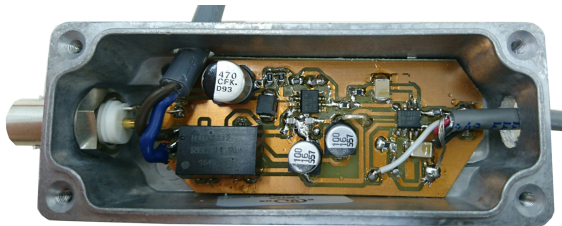
B.6. Übersicht über selbstentwickelte Komponenten der LPDMU



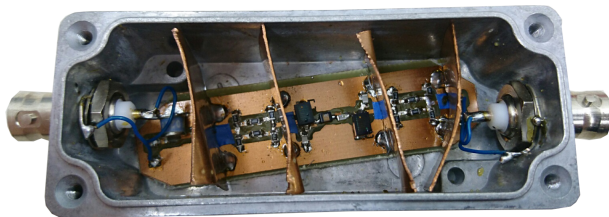
(a) LPDMU mit autarker Energieversorgung



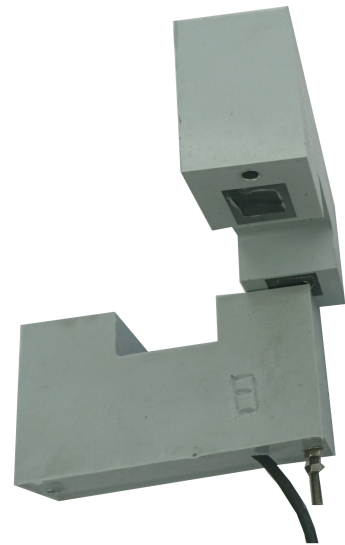
(b) Rogowskispule



(c) Integrator mit Stromversorgung und Signalanpassung



(d) Bandpass mit Dämpfungsglied und Schutz



(e) Eingegossener HFCT

Abbildung B.9.: Übersicht über die LPDMU mit angeschlossener autarker Stromversorgung, sowie einigen ausgewählten selbst entwickelten Komponenten

C. Heidler-Funktion

$$i_h(t) = \sum_{k=1}^m \frac{I_{p,k}}{\eta_k} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_{1k}}\right)^{n_k}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{1k}}\right)^{n_k}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{2k}}} \quad (C.1)$$

$$\eta_k = e^{-\frac{\tau_{1k}}{\tau_{2k}} \cdot \left(n_k \frac{\tau_{2k}}{\tau_{1k}}\right)^{\frac{1}{n_k}}} \quad (C.2)$$

Die Heidler-Funktion ist entsprechend Gleichung C.1 und C.2, eine Doppel exponentialfunktion die über einen Verzug verfügt. Die vereinfachte Form mit $n = 10$ beschreibt in der Blitzschutznorm den Blitzstromverlauf für Erst- und Folgeblitze der vier Blitzschutzklassen, entsprechend Tabelle C.1 [IEC 62305-1]. Die Heidlerfunktion kann auch genutzt werden, um reale Blitzstromverläufe anzunähern [Jav 2012], [DV 2007].

Tabelle C.1.: Parameter zur Darstellung realer Blitzstromverläufe mit der Heidler-Funktion [Coo 2009]

Parameter	First Return Stroke (FRS)			Subsequent Return Stroke (SRS)		
	LPL			LPL		
	I	II	III - IV	I	II	III - IV
I_p (kA)	200	150	100	50	37,5	25
η	0,93	0,93	0,93	0,993	0,993	0,993
n	10	10	10	10	10	10
τ_1 (μs)	19	19	19	0.454	0.454	0.454
τ_2 (μs)	485	485	485	143	143	143

D. Analytische Grundlagen zu Berechnungen mit dem DEGM

D.1. CIGRÉ-Dichtefunktion in Abhängigkeit von der Enddurchschlagstrecke

Die Häufigkeitsverteilung wird durch die Dichtefunktion in Gleichung D.1 beschrieben.

$$f_i(I) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta I} \cdot e^{-\frac{(\ln \frac{I}{M})^2}{2\beta^2}} dI = 1 \quad (\text{D.1})$$

Die wesentliche Eigenschaft dieser Dichtefunktion ist, dass ihr Flächeninhalt Eins ist. Die Übersetzung von Enddurchschlagstrecke und Stromscheitel ist in der Norm mit Gleichung D.2 angegeben.

$$r = 10 \cdot I_p^{0,65} \quad (\text{D.2})$$

$$\begin{array}{ll} I_p & \text{in kA} \\ r & \text{in m} \end{array}$$

Stellt man die Gleichung nach I um, so ergibt sich Gleichung D.3.

$$I = \left(\frac{r}{10} \right)^{\frac{1}{0,65}} \quad (\text{D.3})$$

Diese Gleichung wird nun in Gleichung D.1 eingesetzt. Hierbei muss beachtet werden, dass auch die Integrationsgrenzen angepasst werden müssen. Wird die Gleichung D.3 abgeleitet, so entsteht der Ausdruck in Gleichung D.3. Dieser Ausdruck muss der Dichteverteilung hinzu multipliziert werden.

$$\frac{dI}{dr} = \left(\frac{r}{10} \right)^{\frac{0,35}{0,65}} \quad (\text{D.4})$$

Es ergibt sich schließlich die Dichtefunktion in Abhängigkeit von der Enddurchschlagstrecke nach Gleichung D.5.

$$f_i(r) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta \left(\frac{r}{10}\right)^{\frac{1}{0,65}}} \cdot e^{-\frac{\ln\left(\frac{\left(\frac{r}{10}\right)^{\frac{1}{0,65}}}{M}\right)^2}{2\beta^2}} \left(\frac{r}{10}\right)^{\frac{0,35}{0,65}} dr = 1 \quad (\text{D.5})$$

D.2. Integration der CIGRÉ-Dichtefunktion mit einer Polynomfunktion

Möchte man die Einfangfläche für ein Element berechnen, so muss die Entwicklung der Einfangfläche in Abhängigkeit von der Enddurchschlagstrecke r bekannt sein, denn dann kann sie mit der Auftretenswahrscheinlichkeit von negativen und positiven Erdblitzten multipliziert und integriert werden. Bezieht man diesen Wert auf einen Quadratkilometer und multipliziert ihn mit der Erdblitzdichte, so kann genau ermittelt werden, wie häufig ein Element pro Jahr getroffen wird.

Die Häufigkeitsverteilung wird durch Gleichung D.1 repräsentiert. Durch die Substitution von $I = Me^z$ entsteht der folgende Term:

$$\begin{aligned} \Rightarrow z &= \ln\left(\frac{I}{M}\right) \\ \frac{dz}{dI} &= \frac{1}{M} \cdot \frac{1}{\left(\frac{I}{M}\right)} \\ dI &= I dz \end{aligned} \quad (\text{D.6})$$

Dieser wird nun in $f_i(I)$ eingesetzt:

$$\Rightarrow f(z) = \int \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta} e^{-\frac{z^2}{2\beta^2}} dz \quad (\text{D.7})$$

Wenn $A_h(r) = \sum_j a_j r^j$ von polynomialer Form ist, so folgt mit $r = 10I^{0,65}$ und $I = Me^z$:

$$\begin{aligned}
 A_h(r) &= \sum_j a_j r^j \\
 A_h(I) &= \sum_j a_j (10 \cdot I^{0,65})^j \\
 &= \sum_j a_j 10^j \cdot I^{0,65j} \\
 A_h(z) &= \sum_j a_j 10^j \cdot (Me^z)^{0,65j} \\
 &= \sum_j a_j 10^j \cdot M^{0,65j} e^{0,65jz}
 \end{aligned} \tag{D.8}$$

Damit ergibt sich nun als Multiplikation:

$$A_h(z)f(z) = \int \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta} \cdot \sum_j a_j 10^j M^{0,65j} e^{-\left(\frac{1}{\sqrt{2\beta}}\right)^2 (z - \beta^2 j^{0,65})^2} e^{\frac{(\beta j^{0,65})^2}{2}} dz \tag{D.9}$$

Um das Integral zu lösen, muss man also im Einzelnen die Stammfunktionen von $e^{-\frac{z^2}{2\beta^2} + 0,65jz}$ ermitteln. Das Integral ist nicht durch elementare Funktionen darstellbar. Um nun das Integral zu ermitteln, wird wie folgt vorgegangen:

$$\begin{aligned}
 e^{-\frac{z^2}{2\beta^2} + 0,65jz} &= e^{-\frac{z^2}{2\beta^2} + 0,65jz} \\
 &= e^{-\frac{1}{2\beta^2}(z^2 - 2\beta^2 0,65jz)} \cdot e^{-\frac{1}{2\beta^2}(\beta^2 0,65j)^2} \cdot e^{\frac{1}{2\beta^2}(\beta^2 0,65j)^2} \\
 &= e^{-\frac{1}{2\beta^2}\left(z^2 - 2\beta^2 0,65jz + (\beta^2 0,65j)^2\right)} \cdot e^{\frac{1}{2\beta^2}(\beta^2 0,65j)^2} \\
 &= e^{-\frac{1}{2\beta^2}(z - \beta^2 0,65j)^2} \cdot e^{\frac{1}{2\beta^2}(\beta^2 0,65j)^2} \\
 &= e^{-\left(\frac{1}{\sqrt{2\beta}}\right)^2 (z - \beta^2 0,65j)^2} e^{\frac{1}{2}\beta^2 0,65^2 j^2}
 \end{aligned} \tag{D.10}$$

Eine erneute Substitution wird mit $u = \left(\frac{1}{\sqrt{2}\beta}\right) (z - \beta^2 0,65j)$ vorgenommen:

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{\sqrt{2}\beta}\right) (z - \beta^2 0,65j) &= \frac{z}{\sqrt{2}\beta} - \frac{\beta^2 0,65j}{\sqrt{2}\beta} \\ \frac{du}{dz} &= \frac{1}{\sqrt{2}\beta} \\ du &= \frac{1}{\sqrt{2}\beta} dz \\ dz &= \sqrt{2}\beta du \end{aligned} \tag{D.11}$$

Dies führt nun zu:

$$\begin{aligned} A_h(u)f(u) &= \int \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta} \sum_j a_j 10^j M^{0,65j} e^{-u^2} e^{\left(\frac{\beta 0,65j}{\sqrt{2}}\right)^2} \sqrt{2}\beta du \\ &= \int \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_j a_j 10^j M^{0,65j} e^{\left(\frac{\beta 0,65j}{\sqrt{2}}\right)^2} e^{-u^2} du \end{aligned} \tag{D.12}$$

Es gilt weiter: $\int_0^x e^{-u^2} du = \frac{1}{2}\sqrt{\pi}\text{erf}(x)$ Setzt man dies nun in die Gleichung ein, so ergibt dies endgültig:

$$A_h(u)f(u) = \frac{1}{2} \sum_j a_j 10^j M^{0,65j} e^{\left(\frac{\beta 0,65j}{\sqrt{2}}\right)^2} \cdot \text{erf}(x) \tag{D.13}$$

Wenn man allerdings von vornherein ein Integral der Gestalt $\int_0^h f_i(r)A_h(r)dr$ integrieren will, so muss man bei jeder Substitution auch die Integralgrenzen anpassen. Das heisst mit jeder oben durchgeführten Substitution, verändert sich auch der Integrationsbereich.

$$I(r) = \left(\frac{r}{10}\right)^{\frac{1}{0,65}} \tag{D.14}$$

$$z(I) = \ln\left(\frac{I}{M}\right) \tag{D.15}$$

$$u(z) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}\beta}\right) (z - \beta^2 0,65j) \tag{D.16}$$

Das führt im Einzelnen zu:

$$u(r) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}\beta} \right) \left(\ln \left(\frac{\left(\frac{r}{10} \right)^{\frac{1}{0,65}}}{M} \right) - \beta^2 0,65j \right) \quad (\text{D.17})$$

Damit ergibt sich die Gesamtlösung zu:

$$A(r, M, \beta)_{\text{d,DEGM}} = \frac{1}{2} \sum_j a_j 10^j M^{0,65j} e^{\left(\frac{\beta^2 0,65j}{\sqrt{2}} \right)^2} \cdot \text{erf} \left(\left(\frac{1}{\sqrt{2}\beta} \right) \left(\ln \left(\frac{\left(\frac{r}{10} \right)^{\frac{1}{0,65}}}{M} \right) - \beta^2 0,65j \right) \right) \quad (\text{D.18})$$

Mit dieser Gleichung lassen sich nun die Einfangflächen berechnen.

Literaturverzeichnis

Literatur

- [AC 2001] Mose Akyuz und Vernon Cooray. „The Franklin lightning conductor: conditions necessary for the initiation of a connecting leader“. In: *Journal of Electrostatics* 51 (2001), 319–325.
- [AC 2014a] Liliana Arevalo und Vernon Cooray. „Streamer to leader transition criteria for propagation of long sparks and lightning leaders“. In: *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. IEEE conference proceedings. 2014, 480–483.
- [AC 2014b] Liliana Arevalo und Vernon Cooray. „Upward leader inception caused by a sudden change of cloud electric field“. In: *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. IEEE. 2014, 484–487.
- [AF 1998] NL Allen und DC Faircloth. „Some factors relating to the early streamer emission principle“. In: *ERA Technologies Conference on Lightning Protection*. Band 3. 1998, 1–3.
- [All 1998] NL Allen, KJ Cornick, DC Faircloth und CM Kouzis. „Tests of the 'early streamer emission' principle for protection against lightning“. In: *Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings*. Band 145. 5. IET. 1998, 200–206.
- [AW 2009] RJ Adler und VM Weeks. „Design and operation of a 700 kV arbitrary waveform generator“. In: *Pulsed Power Conference, 2009. PPC'09*. IEEE. 2009, 404–407.

- [BC 2006a] Marley Becerra und Vernon Cooray. „A simplified physical model to determine the lightning upward connecting leader inception“. In: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 21.2 (2006), 897–908.
- [BC 2006b] Marley Becerra und Vernon Cooray. „Time dependent evaluation of the lightning upward connecting leader inception“. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 39.21 (2006), 4695.
- [BC 2007] Marley Becerra Garcia und Vernon Cooray. „The early streamer emission principle does not work under natural lightning!“ In: *IX International Symposium on Lightning Protection. Foz do Iguaçu, Brazil. 26th-30th November. 2007.*
- [BC 2008] Marley Becerra und Vernon Cooray. „Laboratory experiments cannot be utilized to justify the action of early streamer emission terminals“. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 41.8 (2008), 085204.
- [BD 2003] Professor Edward M Bazelyan und Mark M Drabkin. „Scientific and technical basis for preventing lightning strikes to earthbound objects“. In: *Power Engineering Society General Meeting. Band 4. IEEE. 2003.*
- [Bec 2008] Marley Becerra. „On the attachment of lightning flashes to grounded structures“. Dissertation. 2008.
- [Bec 2012] Marley Becerra. „Self-consistent leader inception and propagation model SLIM: Response to some criticism“. In: *International Conference on Lightning Protection (ICLP). IEEE. 2012, 1–7.*
- [Ber 1975] Karl Berger. „Parameters of lightning flashes“. In: *Electra* 41 (1975), 23–37.
- [Ber 1994] G Berger. „Formation of the positive leader of long air sparks for various types of rod conductor“. In: *22nd International Conference on Lightning Protection. 1994, 2–01.*
- [Ber 2003] JL Bermudez, M Rubinstein, F Rachidi, F Heidler und M Pao-lone. „Determination of reflection coefficients at the top and bottom of elevated strike objects struck by lightning“. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108.D14 (2003).

-
- [Bey 1986] Manfred Beyer, W Boeck, K Möller und W Zaengl. *Hochspannungstechnik*. 1986.
- [BG 1984] K Berger und E Garabagnati. „Lightning current parameters“. In: *Results obtained in Switzerland and in Italy, URSI Conf., Florence, Italy*. 1984.
- [Bod 1778] John Boddington, Edward Nickson, Benjamin Wilson, John Pringle, Amherst, Charles Frederick, Chas. Cocks, W Watson, H Cavendish, W Henly et al. „Sundry Papers Relative to an Accident from Lightning at Purfleet, May 15, 1777“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (1778), 232–317.
- [Bog 2013] Alexander Bogner, Alfons Bora, Sabine Maasen, Carsten Reinhardt und Peter Wehling. *Ethisierung der Technik–Technisierung der Ethik*. Nomos, 2013.
- [CA 1995] Roy B Carpenter und Ralph L Auer. „Lightning and surge protection of substations“. In: *Industry Applications, IEEE Transactions on* 31.1 (1995), 162–170.
- [Car 1991] Jr Roy B Carpenter. „Spline Ball Terminal (sbt)“. Patent US 5073678 A. Dez. 1991.
- [Car 2003] Roy B Carpenter Jr. „Statistical and testing background proving the viability of lightning strike prevention“. In: *Power Engineering Society General Meeting*. Band 4. IEEE. 2003.
- [CD 1998] Roy B Carpenter Jr und Mark M Drabkin. „Protection against direct lightning strokes by charge transfer system“. In: *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Band 2. IEEE. 1998, 1094–1097.
- [CH 2003] KL Chrzan und ZA Hartono. „Inefficacy of radioactive terminals and early streamer emission terminals“. In: *Proceedings of XIII Symposium on High Voltage Engineering, Rotterdam, Netherlands*. 2003, 1–4.

- [Cha 1998] ID Chalmers, JC Evans, WH Siew, NL Allen, DA Greaves und I Cotton. „Laboratory testing of early streamer emission air terminals“. In: *Proceeding of the international conference on lightning protection*. 1998, 412–417.
- [Chr 2003] Krystian Leonard Chrzan. „Untersuchungen an Early Streamer Emission-Fangstangen“. In: *VDE-Fachbericht 60* (2003), 221–228.
- [CoK 2013] DEHN + SÖHNE GmbH + Co.KG. *Blitzplaner*. 2013.
- [Coo 2009] V. Cooray. *Lightning Protection*. The Institution of Engineering und Technology, 2009.
- [Coo 2010a] Vernon Cooray. „Lightning attractive radii of vertical and horizontal conductors evaluated using a self consistent leader inception and propagation model-SLIM“. In: *Electromagnetic Compatibility (APEMC), 2010 Asia-Pacific Symposium on*. IEEE. 2010, 1209–1213.
- [Coo 2010b] Vernon Cooray, Mahendra Fernando, Liliana Arevalo und Marley Becerra. „Interaction of multiple connecting leaders issued from a grounded structure simulated using a self consistent leader inception and propagation model SLIM“. In: *30TH International Conference on Lightning Protection, ICLP*. 2010.
- [Coo 2014] Vernon Cooray. *The lightning flash*. The Institution of Engineering und Technology, 2014.
- [CRT 2007] Vernon Cooray, Vladimir Rakov und Nelson Theethayi. „The lightning striking distance—Revisited“. In: *Journal of Electrostatics* 65.5-6 (2007), 296–306.
- [CT 1976] G Carrara und L Thione. „Switching surge strength of large air gaps: a physical approach“. In: *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on* 95.2 (1976), 512–524.
- [CT 2007] Vernon Cooray und Nelson Theethayi. „The striking distance of lightning flashes and the early streamer emission (ESE) hypothesis“. In: *Journal of electrostatics* 65.5 (2007), 336–341.

- [DG 2000a] F D'Alessandro und JR Gumley. „The Development of the Three Dimensional Collection Volume Method as an Improved Electrogeometric Model for the Protection of Structures“. In: *Proceedings of ICLP, Rhodes, Greece* (2000), 311–317.
- [DG 2000b] MM Drabkin und S Gryzboski. „Experimental study of the emission current form ion plasma generator“. In: *Proceedings of 25th international conference on lightning protection*. 2000, 385–388.
- [DG 2001] F D'Alessandro und JR Gumley. „A Collection volume method for the placement of air terminals for the protection of structures against lightning“. In: *Journal of electrostatics* 50.4 (2001), 279–302.
- [Die 2005] Gerhard Diendorfer. *Blitzstrommessung am Sender Gaisberg*. Österr. Elektrizitätswirtschafts-Aktienges.(Verbundges.), 2005.
- [Die 2015] Gerhard Diendorfer. „On the risk of upward lightning initiated from wind turbines“. In: *15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. IEEE. 2015, 872–876.
- [Dju 2012] Igor Djurdjevic, IR Jandrell, NJ West und T Govender. „Lightning performance evaluation of quasi-hemispherical air terminations versus a Franklin rod“. In: *Electric Power Systems Research* 85 (2012), 90–94.
- [Dra 1999a] Mark M Drabkin. „Interaction between lightning channel and CTS“. In: *Electromagnetic Compatibility, 1999 IEEE International Symposium on*. Band 2. IEEE. 1999, 643–647.
- [Dra 1999b] Mark M Drabkin. „Protection zone of the charge transfer system“. In: *Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering (Conf. Publ. No. 467)*. Band 2. IET. 1999, 423–425.
- [DV 2007] Alberto De Conti und Silvrio Visacro. „Analytical representation of single-and double-peaked lightning current waveforms“. In: *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 49.2 (2007), 448–451.

- [DZP 2011] G Diendorfer, H Zhou und H Pichler. „Review of 10 years of lightning measurement at the Gaisberg Tower in Austria“. In: *Proc. 3rd International Symposium on Winter Lightning, Sapporo, Japan*. 2011, 185–190.
- [Gal 1979] I Gallimberti. „The mechanism of the long spark formation“. In: *Le Journal de Physique Colloques* 40.C7 (1979), C7–193.
- [Gal 2000] T J Gallagher, C F Huang, M Holly und C Kelliher. „A comparison between lightning dissipators and franklin rods on the impulse response of a scale model of a 110 kV transmission line“. In: *International Conference on Lightning Protection (ICLP)* (2000).
- [GFM 1998] JR Gumley, D’Alessandro F und Austin MA. „Experimental arrangements to study lightning attachment characteristics in northern Australia“. In: *24th International Conference on Lightning Protection*. 1998.
- [GLS 1976] BN Gorin, WI Lewitow und AW Schkiljew. „Besonderheiten der Blitzeinschläge in den Ostankino-Fernsehturm“. In: *13th International Conference on Lightning Protection*. Band 1. 1976.
- [GMD 2009] S Grzybowski, S Mallick und T Disyadej. „Review of lightning performance study on dissipation devices“. In: *North American Power Symposium (NAPS), 2009*. IEEE. 2009, 1–5.
- [GO 1996] A.S. Gayvoronsky und A.G. Ovsyannikov. „New possibilities of physical modelling of orientation process and the influence of lightning leader on the protected object“. In: *23rd International Conference on Lightning Protection*. 1996, 440–443.
- [Gro 1972] Les Renardières Group et al. „Research on Long Air Gap Discharges at Les Renardières“. In: *Electra 23, Paris 23* (1972), 53–157.
- [Gro 1977] Les Renardières Group et al. „Positive discharge in long air gaps at Les Renardières: 1975 Results and Conclusions“. In: *Electra 53, Paris 53* (1977), 31–153.

-
- [Gro 1981] Les Renardières Group et al. „Negative Discharges in Long Air Gaps at Les Renardières, 1978 Results“. In: *Electra 74, Paris* (1981), 67–216.
- [Grz 2005] S Grzybowski, CD Taylor, B Rodriguez-Medina, C Bean und D Haygood. „Emission current from static dissipator devices at switching impulses“. In: *Proceedings of the VIII SIPDA* (2005), 201–206.
- [Grz 2007] S Grzybowski, CD Taylor, C Bean, H Gupta und J Grasty. „Experimental study of emission current from lightning protection devices under rain and wind conditions“. In: *Proceedings of the XI-th International Symposium on Lightning Protection*. Citeseer. 2007, 87–91.
- [GT 1996] S Grzybowski und CD Taylor. „Effectiveness of Dissipators Used for Lightning Protection on 115 kV Transmission and 13 kV Distribution Lines–Long Gap Model Tests“. In: *Proceedings of the 23rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. 1996, 479–484.
- [Gum 1990] JR Gumley. „Lightning interception techniques“. In: *20th International Conference on Lightning Protection*. 1990.
- [Gum 1999] JR Gumley, FD Alessandro, CJ Kossmann und A Rousseau. „A new, high voltage, arbitrary waveform generator for lightning protection research and other applications“. In: *Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering*. Band 1. IET. 1999, 152–155.
- [Gum 2001] John Richard Gumley. „Lightning air terminals and method of design and application“. Patent US 6320119 B1. Nov. 2001.
- [Hab 1992] E Habiger. *Handbuch Elektromagnetische Verträglichkeit Grundlagen*. Verlag Technik GmbH, 1992.
- [Has 1989] Peter Hasse, Johannes Wiesinger, Wolfgang Zischank, Peter Hasse und Peter Hasse. *Handbuch für Blitzschutz und Erdung*. Pflaum, 1989.

- [Has 2010] P Hasse, F Noack, W Zischank, A Hösl und R Dehn. „Festschrift 125 Jahre ABB“. In: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. Ausschuss für Blitzschutz und Blitzforschung (ABB), 2010.
- [Hea 1993] KP Heary, AZ Chaberski, F Richens und JH Moran. „Early streamer emission enhanced air terminal performance and zone of protection“. In: *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*. IEEE. 1993, 26–32.
- [HH 1998] Fridolin Heidler und Christian Hopf. „Measurement results of the electric fields in cloud-to-ground lightning in nearby Munich, Germany“. In: *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on* 40.4 (1998), 436–443.
- [HHL 2014] HHLR. „<http://www.hhhr.tu-darmstadt.de/>“. In: *HRZ* (2014).
- [Hoo 1997] Martin Hoof. „Impulsfolgen-Analyse: Ein neues Verfahren der Teilentladungsdiagnostik“. Dissertation. 1997.
- [Hor 1967] T Horvath. „Wirtschaftlicher Blitzschutz von Bauwerken auf Grund der Wahrscheinlichkeitstheorie“. In: *Periodica polytechnica: Electrical Engineering* 11 (1967), 253–259.
- [Hor 1989] T Horvath. „Computation of the lightning stroke probability and the effectiveness of the air termination“. In: *Journal of Electrostatics* 23 (1989), 305–322.
- [Hor 2010] T Horváth. „Construction of the Protected Volume with Proper Application of Rolling Sphere Method“. In: *30th International Conference on Lightning Protection-ICLP*. 2010.
- [HR 2000] ZA Hartono und I Robiah. „Location factor and its impact on antennae safety with reference to direct lightning strikes“. In: *TENCON 2000. Proceedings*. Band 2. IEEE. 2000, 351–356.
- [HR 2003] ZA Hartono und I. Robiah. „A long term study on the performance of early streamer emission air terminals in a high keranic region“. In: *Applied Electromagnetics, 2003. APACE 2003. Asia-Pacific Conference on*. IEEE. 2003, 146–150.

-
- [HR 2006] ZA Hartono und I Robiah. „A review of studies on Early Streamer Emission and Charge Transfer System conducted in Malaysia“. In: *Electromagnetic Compatibility, 2006. EMC-Zurich 2006. 17th International Zurich Symposium on*. IEEE. 2006, 128–131.
- [HR 2008] ZA Hartono und I Robiah. „Case studies on the performance of commercial-grade lightning event counters“. In: *Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*. IEEE. 2008, 486–489.
- [HR 2011] ZA Hartono und I. Robiah. „The Minaret Incidents At Putrajaya“. In: IEEE. 2011.
- [HS 2009] Fridolin Heidler und Klaus Stimper. *Blitz und Blitzschutz: Grundlagen der Normenreihe VDE 0185, Entstehung von Gewittern, Blitzortungssysteme, Blitzströme und ihre Wirkungen, Schutz von Gebäuden und elektrischen Anlagen, Generatoren für die Stromprüfung*. VDE Verlag, 2009.
- [Hus 2010] AM Hussein, S Jan, V Todorovski, M Milewski, KL Cummins und W Janischewskyj. „Influence of the CN Tower on the lightning environment in its vicinity“. In: *2010 ILDC* (2010).
- [HW 2004] A Haddad und Doug F Warne. *Advances in high voltage engineering*. Band 40. IET, 2004.
- [HW 2016] Harold S Haller und Wojbor A Woyczynski. „Interception efficiency of CVM-based lightning protection systems for buildings and the fractional Poisson model“. In: *arXiv preprint arXiv:1602.01395* (2016).
- [Ign 2016] Milan Ignjatovic, Jovan Cvetic, Nikola Mijajlovic, Dragan Pavlovic und Fridolin Heidler. „Space charge distribution inside the corona sheath during a return stroke“. In: *33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. IEEE. 2016, 1–5.

- [Jan 1997] W Janischewskyj, AM Hussein, V Shostak, I Rusan, J-X Li und JS Chang. „Statistics of lightning strikes to the Toronto Canadian National Tower (1978-1995)“. In: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 12.3 (1997), 1210–1221.
- [Jav 2012] Vesna Javor. „New functions for representing IEC 62305 standard and other typical lightning stroke currents“. In: *Journal of lightning Research* 4.2 (2012), 50–59.
- [Kön 1993] Dieter König. *Teilentladungen in Betriebsmitteln der Energietechnik*. vde-Verlag, 1993.
- [KSM 2010] Alexander Kern, Christof Schelthoff und Moritz Mathieu. „Die dynamische Blitzkugel: Wahrscheinlichkeitsberechnung für Blitzeinschläge in Gebäude“. In: Die Fachzeitschrift für das Elektrohandwerk. 13-14 (2010) (2010), 24–29.
- [KSM 2011] Alexander Kern, Christof Schelthoff und Moritz Mathieu. „Detaillierte Berechnung der Einfangwirksamkeiten von Fangeinrichtungen mit einem dynamischen elektro-geometrischen Modell“. In: (2011).
- [Küc 2009] Andreas Küchler. „Hochspannungstechnik“. In: *VDI-Verlag, Düsseldorf* (2009).
- [Kuw 1998] Nobuo Kuwabara, Tetsuya Tominaga, Masaru Kanazawa und Shoich Kuramoto. „Probability occurrence of estimated lightning surge current at lightning rod before and after installing dissipation array system (DAS)“. In: *Electromagnetic Compatibility, 1998. 1998 IEEE International Symposium on*. Band 2. IEEE. 1998, 1072–1077.
- [Lal 2002] Philippe Lalande, Anne Bondiou-Clergerie, G Bacchiega und I Gallimberti. „Observations and modeling of lightning leaders“. In: *Comptes Rendus Physique* 3.10 (2002), 1375–1392.
- [Lu 2011] Weitao Lu, Luwen Chen, Yang Zhang, Ying Ma, Qiyuan Yin, Shaodong Chen und Yijun Zhang. „Unconnected upward leaders observed in Guangzhou during 2009–2010“. In: *7th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL)*. IEEE. 2011, 609–613.

- [Lu 2012] W Lu, L Chen, Y Ma, Y Gao, Y Thang, Q Yin und Y Zhang. „Analysis of an Attachment Process with Junction Point below the Tip of Upward Connecting Leader“. In: *31st International Conference on Lightning Protection-ICLP*. 2012.
- [Lu 2015] W Lu, Q Qi, Y Ma, L Chen, X Yan und Y Zhang. „High-Speed Video Observations of a Close Natural Negative Stepped Leader“. In: *Asia-Pacific International Conference on Lightning*. 2015, 117–121.
- [Man 2014] Michael Manhardt. „Messung von Blitzströmen und Blitzfeldern“. Dissertation. Universität der Bundeswehr München, 2014.
- [MAR 2001] Charles B Moore, Graydon Aulich und William Rison. „Responses of Lightning Rods to Nearby Lightning“. In: *International Conference on Lightning and Static Electricity (ICOLSE)*. Band 11. 13.9. 2001.
- [Mar 2015] V March. „Upward lightning observations on a wind turbine and its implications to environmental factor for risk assessment“. In: *7th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL)*. 2015, 510–516.
- [McE 1939] KB McEachron. „Lightning to the empire state building“. In: *Journal of the Franklin Institute* 227.2 (1939), 149–217.
- [ME 2004] Abdul M Mousa und P Eng. „War of the Lightning Rods“. In: *Electricity Today* 2 (2004).
- [Mik 2014] Toru Miki, Masato Saito, Takatoshi Shindo, Daiki Tanaka, Aki- ra Asakawa, Hideki Motoyama, Masaru Ishii, Yusuke Suzuhigashi und Hiroshi Taguchi. „Upward and downward lightning observed at Tokyo Skytree“. In: *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. IEEE. 2014, 1594–1599.
- [Mou 2003] Abdul M Mousa. „Validity of the lightning elimination claim“. In: *Power Engineering Society General Meeting*. Band 4. IEEE. 2003.

- [Mou 2012] Abdul M Mousa. „Failure of the collection volume method and attempts of the ESE lightning rod industry to resurrect it“. In: *Journal of Lightning Research* 4.2 (2012), 118–128.
- [Mou 2014] Abdul M Mousa. „Flaws of the standards-making process of the IEEE and related impact on lightning protection standards“. In: *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. IEEE. 2014, 488–492.
- [MSS 1992] Kunihiko Miyake, Toshio Suzuki und Kazuo Shinjou. „Characteristics of winter lightning current on Japan Sea coast“. In: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 7.3 (1992), 1450–1457.
- [Noa 1999] F Noack. *Über die Wirksamkeit von ESE-Fangeinrichtungen*. 1999.
- [NSB 2001] F Noack, J Schönau und A Barth. „Untersuchungen zur Wirkung von ionisierenden Fangeinrichtungen“. In: *VDE-Fachbericht* 58 (2001), 169–179.
- [PD 2002] NI Petrov und F D’Alessandro. „Assessment of protection system positioning and models using observations of lightning strikes to structures“. In: *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. Band 458. 2019. The Royal Society. 2002, 723–742.
- [Pei 1990] Dirk Peier. *Elektromagnetische Verträglichkeit*. Huthig Heidelberg, 1990.
- [Pop 1990] F Popolansky. „Lightning current measurement on high objects in Czechoslovakia“. In: *Proceedings of the 20th International Conference on Lightning Protection, Interlaken, Switzerland*. 1990, 1–6.
- [Pri 1977] H Prinz. „Lightning in history“. In: *Lightning: Physics of Lightning, Volume 1 & 2*. Band 1. 1977, 1.
- [Rak 2003] VA Rakov. „A review of positive and bipolar lightning discharges“. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 84.6 (2003), 767.

-
- [RD 1993] WF Ray und RM Davis. „Wide Bandwidth Rogowski Current Transducers: Part I: The Rogowski Coil“. In: *EPE Journal* 3.1 (1993), 51–59.
- [Ret 2006] Kay Rethmeier. „Neue Auskoppelverfahren und Sensoren zur Vor-Ort-Teilentladungsmessung an Hochspannungskabelanlagen“. Dissertation. 2006.
- [Ret 2009] K Rethmeier, A Obralic, A Kraetge, M Krüger, W Kalkner und R Plath. „Improved Noise Suppression by real-time pulse-waveform analysis of PD pulses and pulse-shaped disturbances“. In: *International Symposium on High Voltage on High Voltage Engineering (ISH), Cape Town*. 2009.
- [Ris 2003] William Rison. „Experimental validation of conventional and nonconventional lightning protection systems“. In: *Power Engineering Society General Meeting*. Band 4. IEEE. 2003.
- [Riz 1989] Farouk AM Rizk. „A model for switching impulse leader inception and breakdown of long air-gaps“. In: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 4.1 (1989), 596–606.
- [Rom 2012a] Carlos Romero, Marcos Rubinstein, Farhad Rachidi, Mario Paolone, Vladimir A Rakov und Davide Pavanello. „Some characteristics of positive and bipolar lightning flashes recorded on the Säntis tower in 2010 and 2011“. In: *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. IEEE. 2012, 1–5.
- [RU 2003] Vladimir A Rakov und Martin A Uman. *Lightning: physics and effects*. Cambridge University Press, 2003.
- [Rub 2009] A Rubinstein, C Romero, M Paolone, F Rachidi, M Rubinstein, P Zweiacker und B Daout. „Lightning measurement station on Mount Säntis in Switzerland“. In: *X International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)*. 2009, 9–13.
- [S 2005] M.M.F. Saba, O. Pinto et al. „Lightning current observation of an altitude-triggered flash“. In: *Atmospheric research* 76.1-4 (2005), 402–411.
- [Sch 2010] Klaus Schon. *Stoßspannungs- und Stoßstrommesstechnik: Grundlagen Messgeräte Messverfahren*. Springer-Verlag, 2010.

- [Smo 2013] Alexander Smorgonskiy, Farhad Rachidi, Marcos Rubinstein, Gerhard Diendorfer und Wolfgang Schulz. „On the proportion of upward flashes to lightning research towers“. In: *Atmospheric Research* 129 (2013), 110–116.
- [SSW 1974] H Singer, H Steinbigler und P Weiss. „A charge simulation method for the calculation of high voltage fields“. In: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Citeseer. 1974.
- [TRU 1997] Rajeev Thottappillil, Vladimir A Rakov und Martin A Uman. „Distribution of charge along the lightning channel: Relation to remote electric and magnetic fields and to return-stroke models“. In: *Journal of Geographical Research* 102 (1997), 6987–7006.
- [UR 2002] MA Uman und VA Rakov. „A critical review of nonconventional approaches to lightning protection“. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 83.12 (2002), 1809.
- [Vis 2004] Silvério Visacro, Amilton Soares, Marco Aurélio O Schroeder, Luiz CL Cherchiglia und Vander José de Sousa. „Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station“. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 109.D1 (2004).
- [Vis 2012] Silvério Visacro, Claudia R Mesquita, Alberto De Conti und Fernando H Silveira. „Updated statistics of lightning currents measured at Morro do Cachimbo Station“. In: *Atmospheric Research* 117 (2012), 55–63.
- [VNS 2000] RJ Van Brunt, TL Nelson und KL Stricklett. „Early streamer emission lightning protection systems: An overview“. In: *Electrical Insulation Magazine, IEEE* 16.1 (2000), 5–24.
- [WG3 1991] WG33. „Guide to procedure for estimating the lightning performance of transmission lines“. In: *CIGRÉ brochure* 63 (1991).

- [WK 2014] Martin Wetter und Albin Kern. „Number of lightning strikes to tall structures-comparison of calculations and measurements using a modern lightning monitoring system“. In: *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. IEEE. 2014, 181–187.
- [Xie 2014] Yaoheng Xie, Hengxin He, Junjia He und Chuanqi Wu. „The Effect of Corona Discharge on Leader Initiation in Long Air Gaps“. In: *IEEE Transactions on Plasma Science* 42.4 (2014), 890–895.
- [Zip 2000] Donald W Zipse. „Lightning protection methods: An update and a discredited system vindicated“. In: *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 2000. Conference Record. Papers Presented at the 2000 Annual Meeting. 2000 IEEE*. IEEE. 2000, 155–170.
- [Zor 1998] M Zoro. „Magnetic Tape Peak Current Measurement System; Calibration, Implementation and Results“. In: *Proceedings of 24th International Conference on Lightning Protection*. 1998, 83–87.

Normen und technische Richtlinien

- [DIN EN 62305-1] DIN EN 62305-1. (*VDE 0185-305-1*): *Blitzschutz-Teil 1: Allgemeine Grundsätze*. 2011.
- [DIN EN 62305-2] DIN EN 62305-2. (*VDE 0185-305-2*): *Blitzschutz-Teil 2: Risikomanagement*. 2013.
- [DIN EN 62305-3] DIN EN 62305-3. (*VDE 0185-305-3*): *Blitzschutz-Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen (IEC 62305-3: 2006, modifiziert)*. 201.
- [IEC 60270] IEC 60270/A1/Ed3. *High-voltage test techniques - Partial discharge measurements*. 2015.
- [IEC 62305-1] IEC 62305-1. *Protection against lightning: Part 1 General principles*. 2003.

- [IEC 62305-2] IEC 62305-2. *Protection against lightning: Part 2 Risk management*. 2004.
- [IEC 62305-3] IEC 62305-3. *Protection against lightning: Part 3 Physical damage to structures and life hazard*. 2005.
- [NFC 17-102] NF C 17-102. *Protection against lightning - Early streamer emission lightning protection systems*. 2011.

Eigene Veröffentlichungen

- [Bro 2011] U Broniecki, C Balkon, M Hannig, W Kalkner, W Koltunowicz, A Obralic und R Plath. „Localization of Partial Discharges in Power Transformers by Combined Acoustic and Electric Measurements“. In: *ISH 2011* (2011).
- [Bro 2015] R Brocke, M Hannig, L Herrmann und V Raab. „Graphische Analyse der Einfangwahrscheinlichkeit von Fangeinrichtungen mit Hilfe des DEGM“. In: *VDE/ABB-Blitzschutztagung 2015* (2015).
- [Bro 2016] R Brocke, V Raab, A Kern, M Rock, M Hannig, W Zischank und O Beierl. „Detailed Calculation of Interception Efficiencies for Air-Termination Systems using the Dynamic Electro-Geometrical Model – Practical Applications“. In: *ICLP 2016* (2016).
- [Han 2014] M Hannig, V Hinrichsen, R Brocke und R Hannig. „An analytical consideration on the striking probability and the total amount of strikes to simple structures according to standardized regulations“. In: *ICLP 2014* (2014).
- [HHB 2013] M Hannig, V Hinrichsen und R Brocke. „Entwicklung einer Messeinrichtung zur Erfassung von kleinsten Vorentladungen an einer Blitzfangstange unter Einfluss eines negativen Leitblitzes“. In: *VDE/ABB-Blitzschutztagung 2013* (2013).

- [HHB 2014] M Hannig, V Hinrichsen und R Brocke. „Progress on the development of a measuring instrumentation for detection of pre-discharges on a lightning rod under the influence of a negative downward leader“. In: *ICLP 2014* (2014).

Betreute Diplom-, Master-, Studien- und Bachelorarbeiten

- [Alt 2016] Stephan Altenhein. „Entwicklung eines geeigneten Schirmkonzepts zum Schutz elektronischer Bauteile in unmittelbarer Umgebung eines Blitzeinschlags“. In: *Masterarbeit Nr. 1961* (2016).
- [Dor 2015] Dennis Dormann. „Untersuchung der Einschlagwahrscheinlichkeit an unterschiedlichen Freileitungskonfigurationen mit Hilfe eines dynamischen elektro-geometrischen Modells auf Grundlage der Normenreihe IEC 62305“. In: *Bachelorarbeit Nr. 1942* (2015).
- [Gös 2016] Marvin Gössel. „Untersuchung der positiven Leitblitzentstehung an Fangeinrichtungen unter besonderer Berücksichtigung der Vorentladungen“. In: *Bachelorarbeit Nr. 1962* (2016).
- [Hus 2012] Rashid Hussain. „Entwicklung einer geschirmten Rogowskispule zur Messung von Blitzströmen“. In: *Bachelorarbeit Nr. 1893* (2012).
- [Men 2014] Henrik Menne. „Entwurf und Umsetzung eines Überspannungsschutzes und einer Signalkonditionierung für zwei Signalaufnehmer, zum Betrieb an einer Blitzmesseinrichtung“. In: *Bachelorarbeit Nr. 1934* (2014).
- [Ngu 2015] Viet Anh Nguyen. „Überprüfung und Bewertung der Beweisführungsstrategien zur Wirksamkeit nicht konventioneller Blitzschutzkonzepte“. In: *Bachelorarbeit Nr. 1948* (2015).

- [Plö 2012] Tim Plösser. „Machbarkeitsstudie zur Erzeugung exponentiell ansteigender Stoßspannungen mit nichtlinearen Bauelementen, zur Simulation realer Bodenfeldstärken, unter Einfluss eines Leitblitzes“. In: *Bachelorarbeit Nr. 1894* (2012).
- [Rom 2012b] Tobias Rommel. „Entwicklung eines induktiven Signalaufnehmers mit Ferritkern, zur Auskopplung hochfrequenter Vorentladungen, unter Einfluss eines Leitblitzes“. In: *Bachelorarbeit Nr. 1895* (2012).
- [Sch 2013] Andreas Schütz. „Entwicklung einer unterbrechungsfreien Spannungsversorgung für eine autark arbeitende Blitzmessstation“. In: *Bachelorarbeit Nr. 1915* (2013).
- [Sch 2015] Alexander Schork. „Untersuchung des Vorentladungsverhalten von konventionellen Fangeinrichtungen bei Anlegen einer Schaltstoßspannung“. In: *Studienarbeit Nr. 1949* (2015).
- [Sel 2016] Karsten Selt. „Suche und Evaluierung von Standorten zur Blitzstrommessung unter besonderer Berücksichtigung der Maximierung von Abwärtsblitzen“. In: *Bachelorarbeit Nr. 1963* (2016).
- [Spe 2015] Christian Specht. „Untersuchung der Messunsicherheiten und Vertrauensbereiche von Signalen, gemessen mit einer autarken Blitzmessstation“. In: *Bachelorarbeit Nr. 1941* (2015).

Lebenslauf

Martin Hannig
geboren am 08. März 1980
in Berlin

Werdegang

Seit 07/2016	Entwicklungsingenieur in der Fa. DEHN + SÖHNE GmbH + Co.KG.
07/2011 bis 06/2016	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Hochspannungstechnik der TU Darmstadt
09/2010 bis 03/2011	Diplomarbeit mit dem Titel: „Separierung von Teilentladungsquellen unter Verwendung multifrequenter elektrischer und optischer Messverfahren“
06/2010 bis 09/2010	Praktikum am Versuchsfeld Institut Prüffeld für elektrische Hochleistungstechnik GmbH Berlin
03/2010 bis 06/2010	Studienarbeit mit dem Titel: „Untersuchung zu verbesserten Analysemöglichkeiten des Energiekriteriums bei akustischen Teilentladungen“
09/2001 bis 05/2011	Studium der Elektrotechnik an der TU Berlin
05/2000	Abitur

21. Juni 2017

Erklärung laut § 9 PromO

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Dissertation allein und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur verfasst habe. Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Darmstadt, den 26. Januar 2017

Martin Hannig